

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Шебзухова Татьяна Александровна

Должность: Директор Пятигорского института (филиал) Северо-Кавказского
федерального университета

Дата подписания: 08.06.2023 15:32:43

Уникальный программный ключ:

d74ce93cd40e39275c3ba2f58486412a1c8ef96f

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

Пятигорск 2023

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»

Рассмотрены на заседании ПЦК ИСТиД (филиал) СКФУ в г. Пятигорске

Протокол №__от _____ 2022г.

Составитель
Директор

Т.В. Икаева
З.А. Михалина

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. Введение в дисциплину.

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, 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 подвергается 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, ка-

саться 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 оказывается 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. 2. Основные законы и компоненты электрических цепей и методы расчёта.

Практическая работа по теме «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.

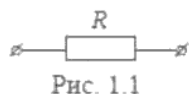
Потребители - это устройства, в которых электрическая энергия превращается в другие виды энергии: в энергию фотонов света (лампа накаливания), в тепло (нагреватели), в механическую энергию (электродвигатели).

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.



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 $g =$ 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.

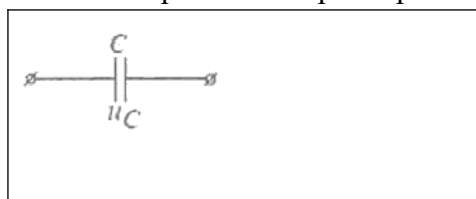


Рис. 1.2

Рис. 1.3

Емкость C — это коэффициент пропорциональности между зарядом q и напряжением элемента. Емкость измеряется в Фарадах (Ф). В линейных цепях емкость постоянна.

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 потокоцеплением и током, текущим через катушку: $L =$

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.

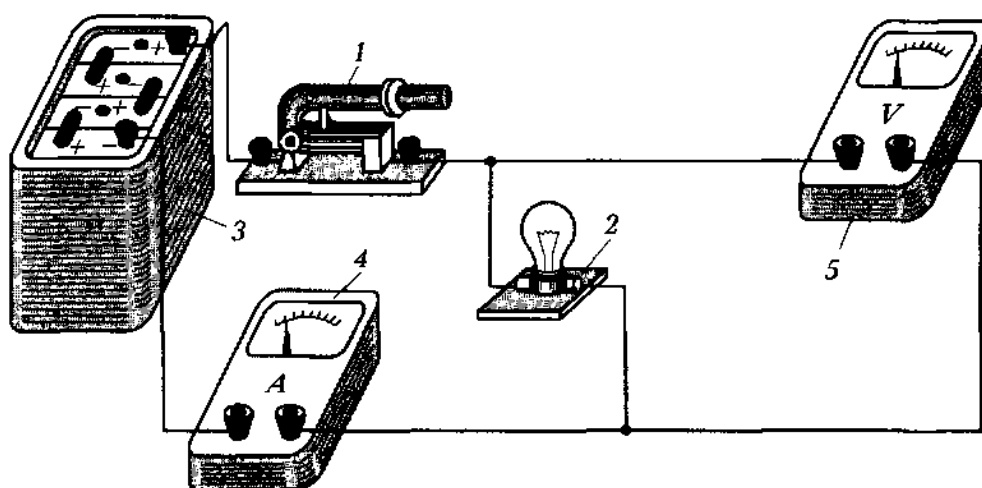


Рис. 2.1

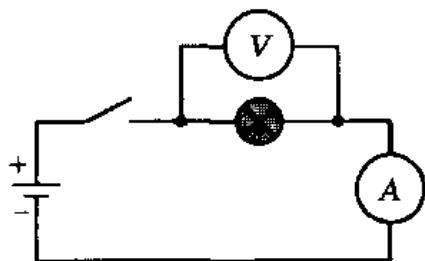


Рис. 2.2

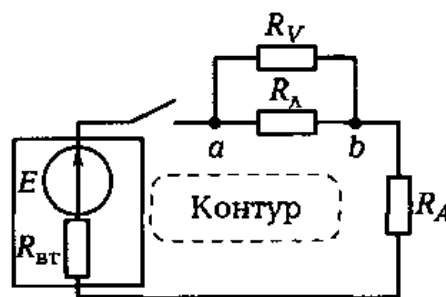


Рис. 2.3

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.

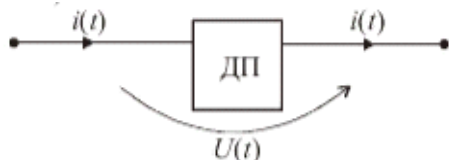
В дальнейшем вместо термина *схема замещения электрической цепи* будем пользоваться сокращенными — *схема цепи*, или *схема*.

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 направ-

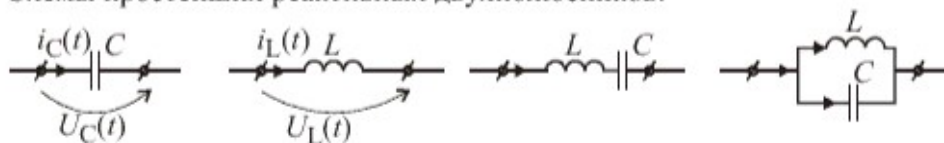
ление напряжения совпадает с положительным направлением тока. Стрелка U направлена от положительного зажима источника или приемника к отрицательному зажиму. Положительное направление э. д. с. совпадает с положительным направлением тока внутри источника (стрелка E направлена от отрицательного зажима источника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

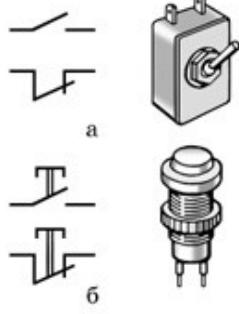
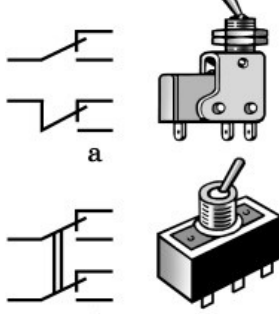
9) ток направлен от высшего потенциала к низшему, т. е. если предположить, что $V_1 > V_2$, то ток и напряжение будут направлены от точки 1 к точке 2.

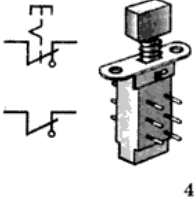
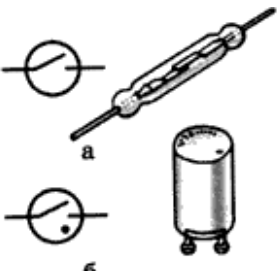
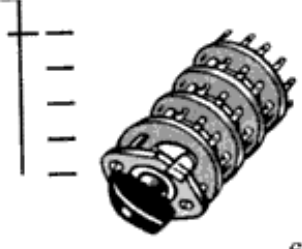
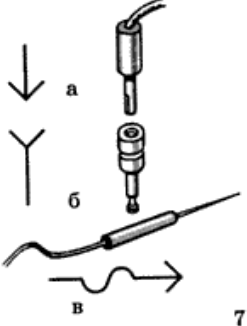
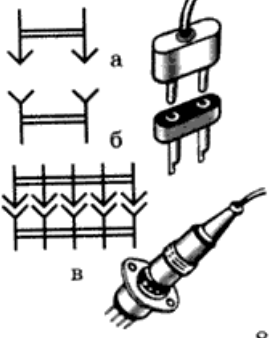
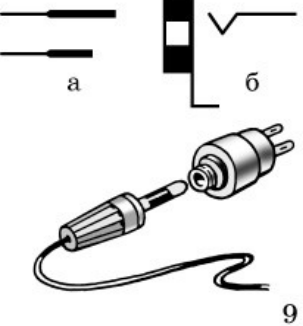
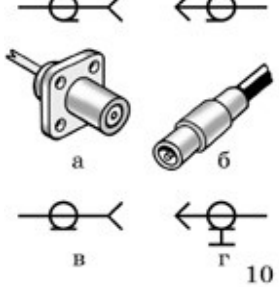
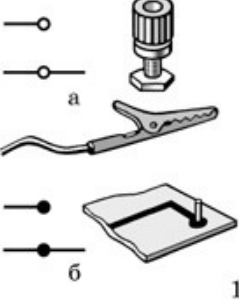
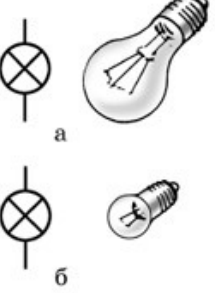
При составлении уравнения электрического состояния ветви слагаемые берут со знаком минус, если на заданном участке происходит падение потенциала, и со знаком плюс, если потенциал возрастает.

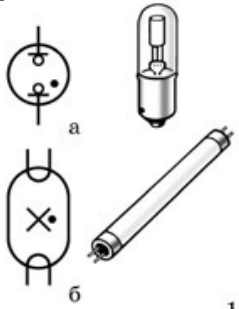
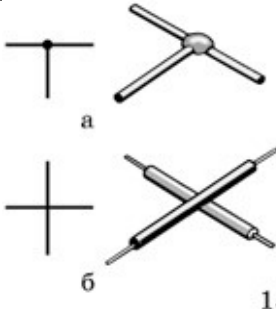
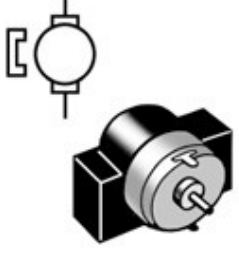
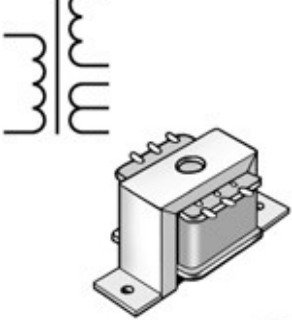
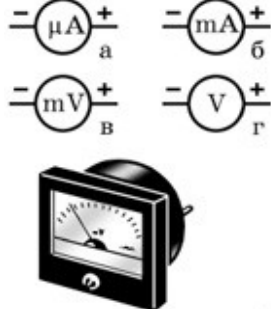
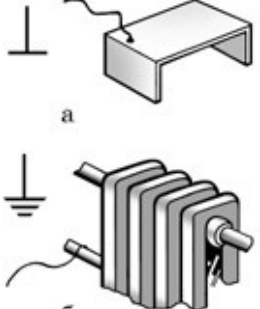
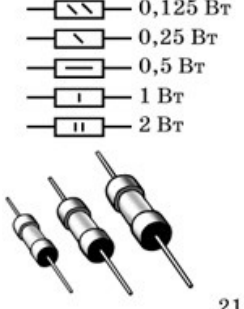
- Любая электрическая цепь может быть представлена электрической схемой замещения, содержащей источники энергии, резистивный, индуктивный и емкостной элементы.
- Электромагнитные процессы в электрических и магнитных цепях характеризуются электрическими величинами: эдс, током, напряжением, а в магнитной 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.

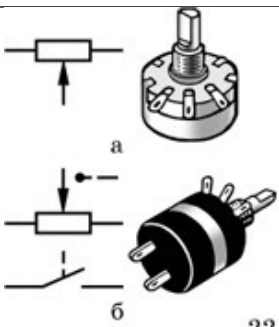
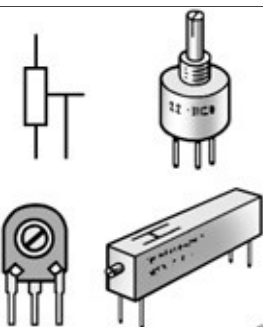
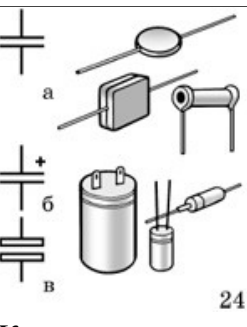
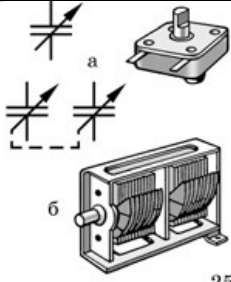
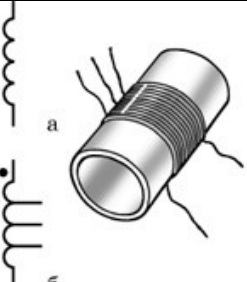
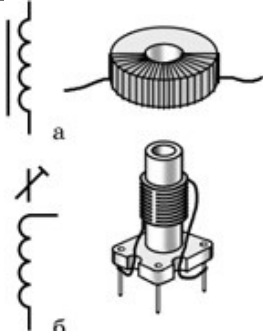
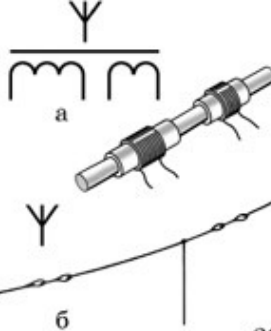
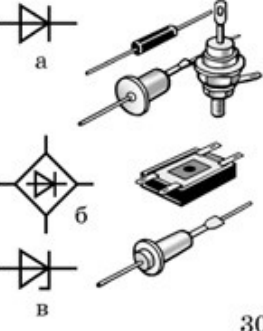
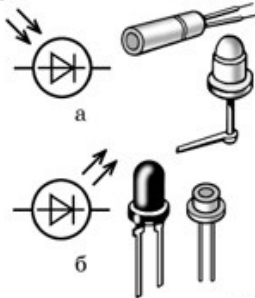
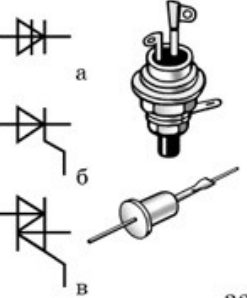
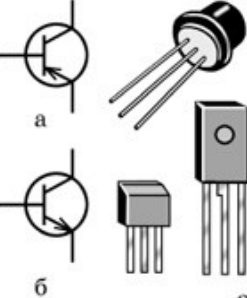
Условные графические обозначения

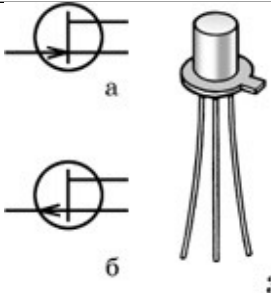
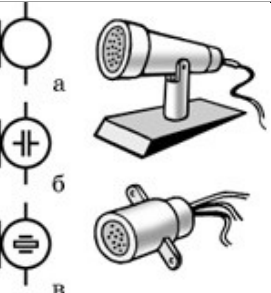
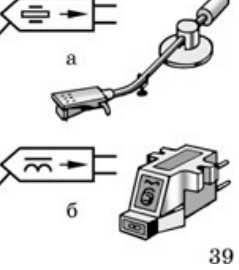
в электрических и радиотехнических схемах

 а б 1 Гальванический элемент или аккумулятор 1, а; батарея таких элементов или	 а б 2 Выключатель с одной группой замыкающих или размыкающих контактов, 2, а; кнопочный выключатель 2, б.	 а б 3 Переключатель с одной (3, а) и двумя (3, б) группами переключающих контактов.
--	---	---

аккумуляторов 1, б.	Наклонная черта — символ подвижного контакта, управляемого ручкой или кнопкой.	
 Кнопочный переключатель с фиксацией положения 4; знак фиксации — кружок на нижнем подвижном контакте.	 Геркон 5, а; стартер 5, б.	 Галетный переключатель 6.
 Штырь или штепсель 7, а; щуп измерительного прибора 7, в; гнездо 7, б.	 Сетевая вилка 8, а; розетка 8, б; многоконтактный разъем 8, в.	 Разъем 9 в малогабаритных приемниках, плейерах.
 Высокочастотное гнездо 10, а; штырь 10, б.	 Контакт соединения: разборного 11, а; неразборного 11, б.	 Осветительная (12, а), индикаторная (12, б) лампы накаливания.

 13 Неоновая индикаторная (13, а), люминесцентная осветительная (13, б) лампы.	 14 Плавкий предохранитель 14.	 15 Соединение (15, а), пересечение (15, б) проводников.
 16 Коллекторный электродвигатель постоянного тока 16: окружность символизирует ротор, касающиеся ее узкие прямоугольники — щетки, П-образная скоба — постоянные магниты статора.	 17 Электродвигатель переменного тока 17: окружность — символ ротора, цепочка полуокружностей над окружностью — основная обмотка, другая цепочка — фазосдвигающая обмотка.	 18 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: диак 32, а; триак 32, б.	 33 Транзисторы биполярные 33.

 Транзисторы полевые 34.	нистор 32, б; симистор 32, в  Микрофоны: электродинамический 35, а; конденсаторный 35, б; пьезоэлектрический и электретный 35, в.	 Головные телефоны 36.
 Динамические громкоговорители 37.	 Пьезоэлектрический звукоизлучатель 38.	 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.
 - 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

- Электрическая цепь.
- Составные элементы электрической цепи.
- Источники электрической энергии.
- Электрическая схема.
- Компонент цепи или схемы.
- Изображение электрических цепей и их элементов.
- Вспомогательные элементы электрических цепей.
- Источники электрической энергии в схеме электрической цепи.
- Как учесть внутреннее сопротивление реального источника.
- Чем характеризуются свойства электрических цепей.

Практическая работа № 3.

Тема 1.2. Основные законы и компоненты электрических цепей.

Практическая работа по теме «Расчёт простых электрических цепей».

Цель работы: Решение задач методом закона Ома и законов Кирхгофа.

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:

;

коэффициент R называют сопротивлением проводника.

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:

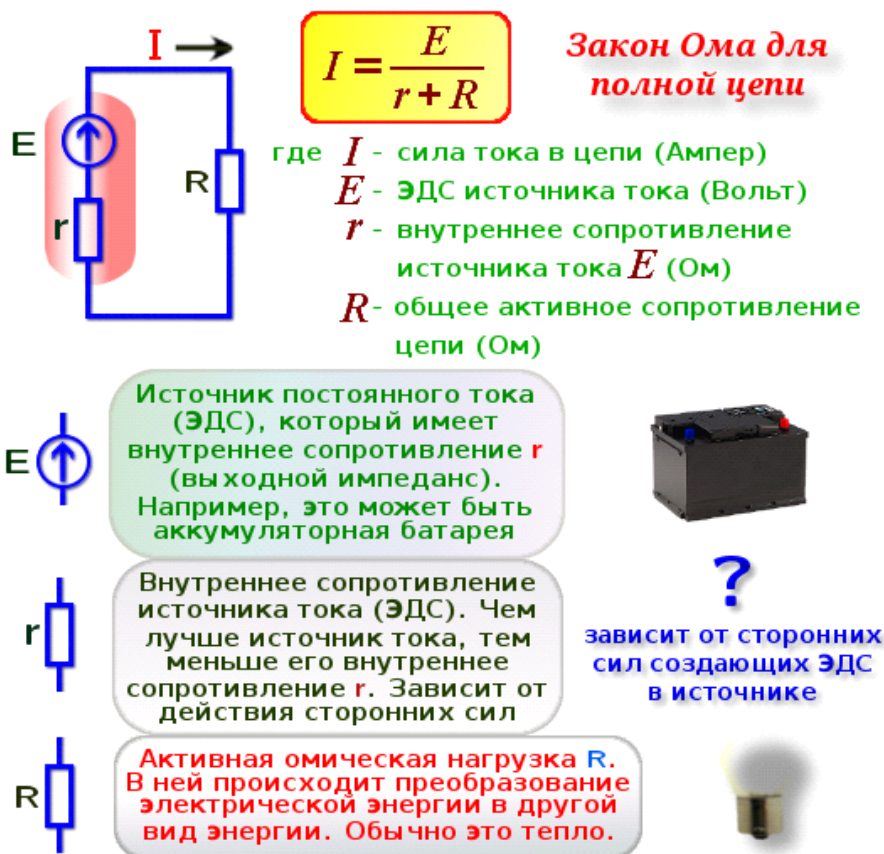
разность потенциалов U между концами цепи равна разности потенциалов между концами каждого из входящих в цепь проводников:

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

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

,

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



Ход работы:

Решение задач.

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 $\epsilon = 7$.

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 $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8}$ 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

ние стали при $T_1 = 293$ К равно $\rho_1 = 1,2 \cdot 10^{-7}$ Ом, температурный коэффициент сопротивления стали $\alpha = 6,0 \cdot 10^{-3}$ К $^{-1}$. Плотность стали $D = 7,8 \cdot 10^3$ кг/м 3 .

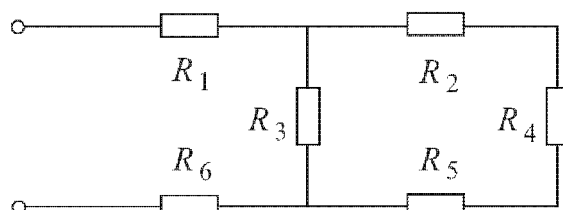
38.7 1 . Цепь, имеющая сопротивление $R = 100$ Ом, питается от источника постоянного напряжения. Амперметр с сопротивлением $R_A = 1$ Ом, включенный в цепь, показал силу тока $I = 5$ А. Какова была сила тока в цепи I_0 до включения амперметра?

38.8 1 . 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.

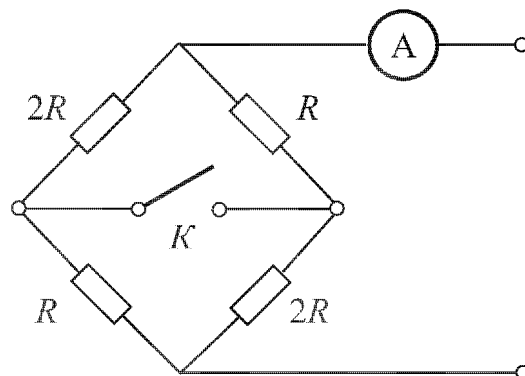
38.9 1 . На сколько равных частей нужно разрезать проводник, имеющий сопротивление $R = 36$ Ом, чтобы полное сопротивление его частей, соединенных параллельно, составляло $R_0 = 1$ Ом?

38.10 2 . 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?

38.11 1 . 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?



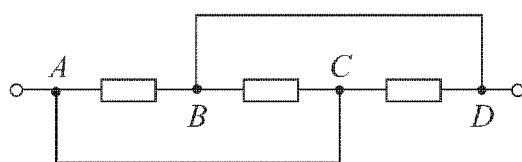
К задаче 38.11.



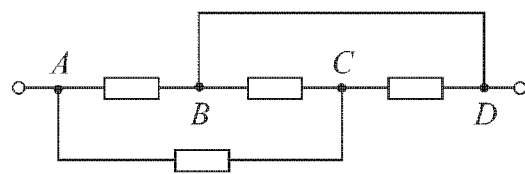
К задаче 38.12.

38.12 1 . 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.

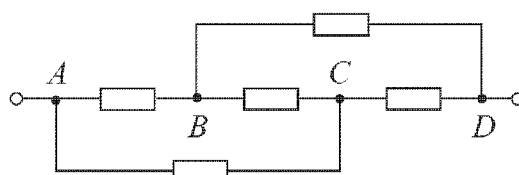
38.13 2 . Определите сопротивление R между точками A и D каждой из показанных на рисунке трех цепей. Сопротивления резисторов одинаковы и равны r . Сопротивлением соединяющих проводов можно пренебречь.



а

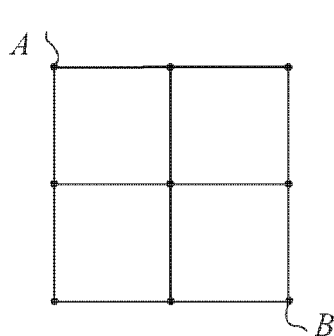


б

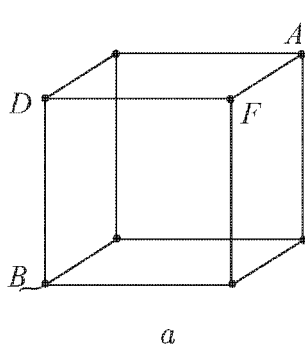


К задаче 38.13.

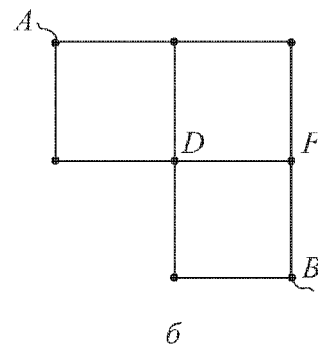
38.14 2 . Определите сопротивление R между точками A и B показанной на рисунке цепи, если сопротивление каждого звена равно r .



К задаче 38.14.



а

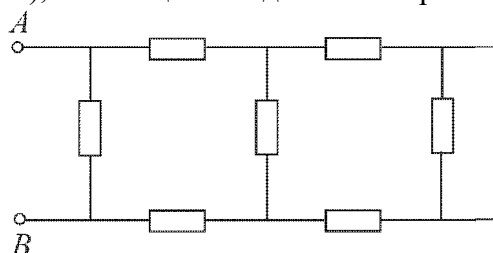


б

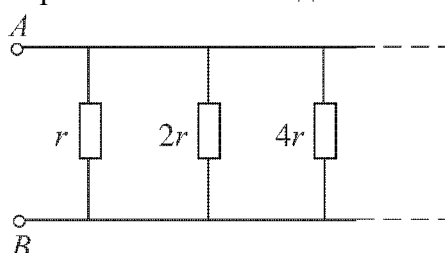
К задаче 38.15.

38.15³. Каждый из отрезков двух проволочных 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.



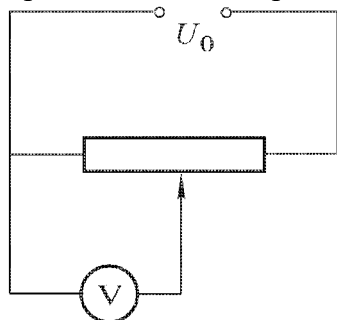
К задаче 38.17.

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

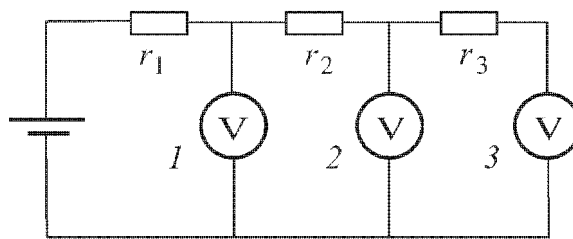
38.18². Имеется прибор с ценой деления $i_0 = 10$ мкА. Шкала прибора имеет $n = 100$ делений. Внутреннее сопротивление прибора $r = 50$ Ом. Как из этого прибора сделать: а) вольтметр с пределом измерения напряжения $U_0 = 200$ В? б) миллиамперметр с пределом измерения силы тока $I_0 = 800$ мА?

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.

Правила Кирхгофа

Обобщенный закон Ома для произвольного участка цепи: произведение силы тока I на сопротивление R участка цепи равно алгебраической сумме падения потенциала ($U_1 - U_2$ на этом участке и ЭДС $\mathcal{E}$ 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 $\mathcal{E}$ и внутренним сопротивлением r и нагрузки с сопротивлением R , равна отношению величины ЭДС к сумме внутреннего сопротивления источника и сопротивления нагрузки:

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

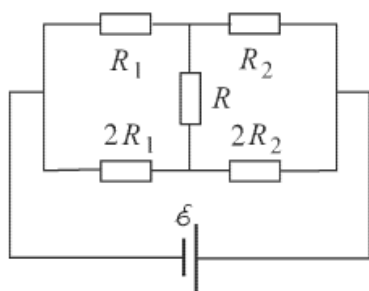
;

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:

Второе правило 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.



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 $I_{кз}$ источника.

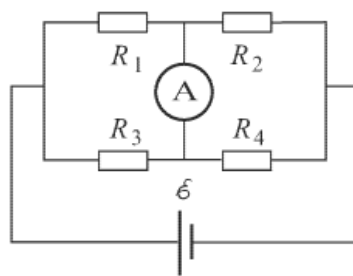


Рис. 1

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 $\mathcal{E}$.

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 $\mathcal{E}$. Рассмотрите два случая: а) $R_1 = R_4 = R$; $R_2 = R_3 = 2R$; б) $R_1 = R_2 = R_3 = R$; $R_4 = 2R$.

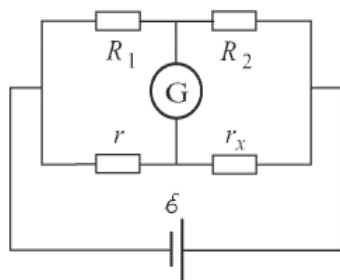


Рис. 3

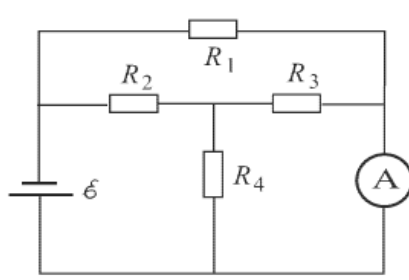


Рис. 4

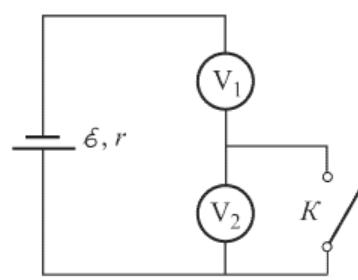


Рис. 5

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

39.6². При замкнутом ключе K вольтметр V_1 показывает напряжение $0,8\mathcal{E}$, где $\mathcal{E}$ – 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 $\mathcal{E}$ и внутренним сопротивлением r каждый (см. рисунок 6). Между точками A и B (на дуге ACB) находится m источников тока.

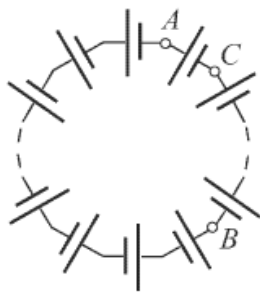


Рис. 6

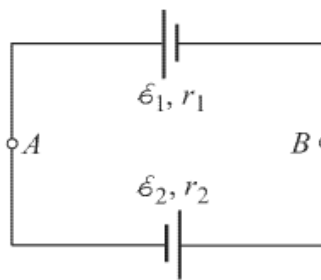


Рис. 7

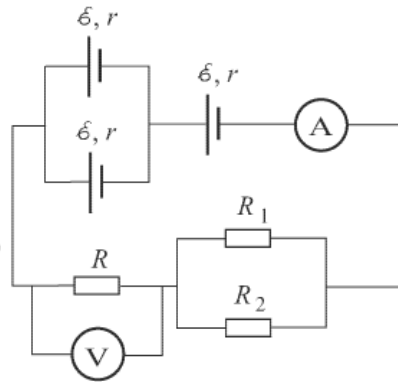


Рис. 8

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

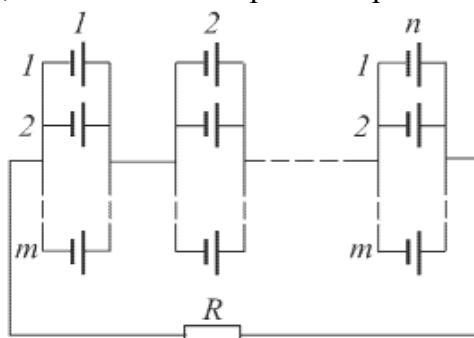
39.9³. Два источника тока соединены, как показано на рисунке 7.

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

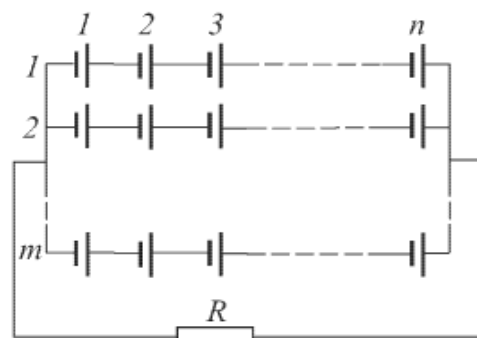
39.10³. Три одинаковых источника с ЭДС $\mathcal{E} = 1,6$ В и внутренним сопротивлением r включены в электрическую цепь по схеме, изображенной на рисунке 8. Миллиамперметр показывает ток $I = 100$ мА. Сопротивления резисторов $R_1 = 10$ Ом и $R_2 = 15$ Ом, сопротивление резистора R неизвестно. Какое 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)?

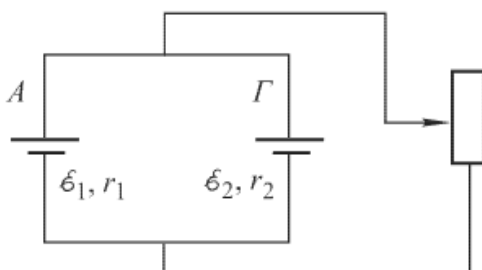


а



б

Рис. 9

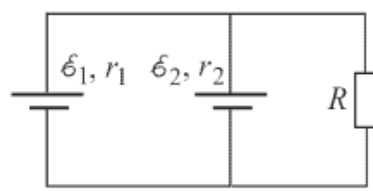
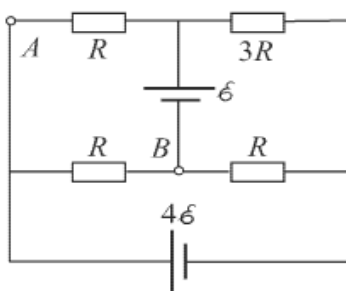
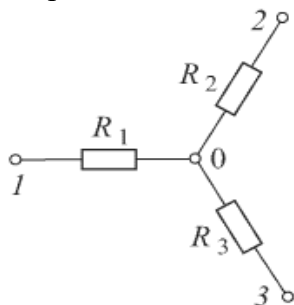


39.13³. Источниками электрического тока в системе электрического оборудования автомобиля являются генератор Γ постоянного тока и

соединенный с ним параллельно аккумулятор A (см. рисунок 10). ЭДС аккумулятора $\mathcal{E}_1 = 12$ В, его внутреннее сопротивление $r_1 = 0,15$ Ом. ЭДС генератора $\mathcal{E}_2 = 14$ В, его внутреннее сопротивление $r_2 = 0,05$ Ом. Найдите зависимость силы тока I_A , Рис. 10

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.



39.15³.

Найдите силу тока I через нагрузку R , подключенную к параллельно соединенным источникам тока с ЭДС $\mathcal{E}_1$ и $\mathcal{E}_2$ и внутренними сопротивлениями r_1 и r_2 соответственно (см. рисунок 11).

Рис. 11

Рис. 12

Рис. 13

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 $4\mathcal{E}$ 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 1.3. Расчёт электрических цепей постоянного тока.

Практическая работа по теме «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).

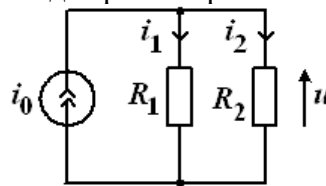


Рис. 1.1.

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 прово-

димостей ветвей. Последние соотношения можно объединить в одно:
 $i_k = i_0 \frac{G_k}{G_{\Sigma}}$, где G_{Σ} – эквивалентная проводимость цепи.

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

Последовательные цепи

Пусть несколько резисторов соединены последовательно (рис. 1.2).

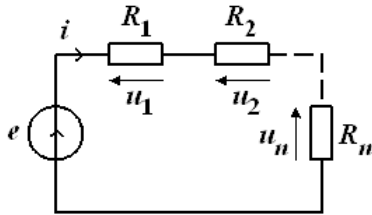


Рис. 1.2.

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.

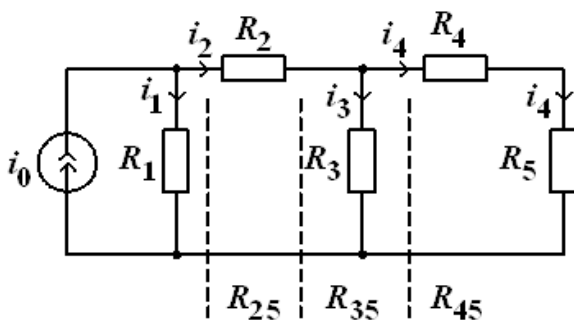


Рис. 1.3.

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.

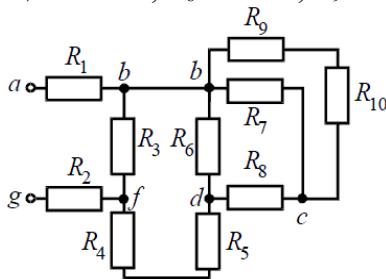


Рис. 1

Решение

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

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

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

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

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

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

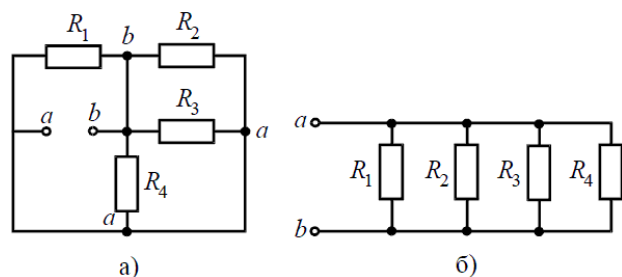


Рис. 2

Решение

Исходную схему можно перерисовать 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:

$$R_{\text{э}} = \frac{R}{n},$$

где R – величина сопротивления, Ом;

n – количество параллельно соединенных сопротивлений.

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

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).

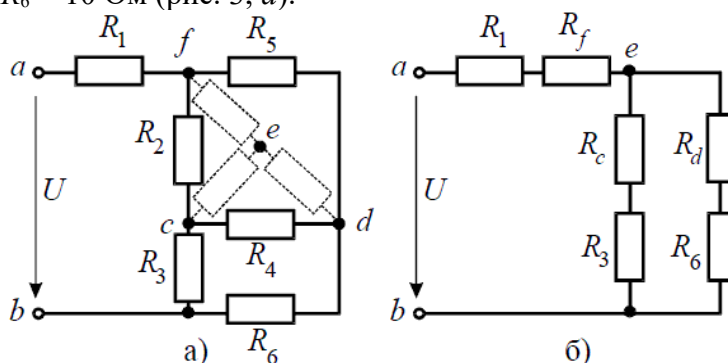


Рис. 3

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.

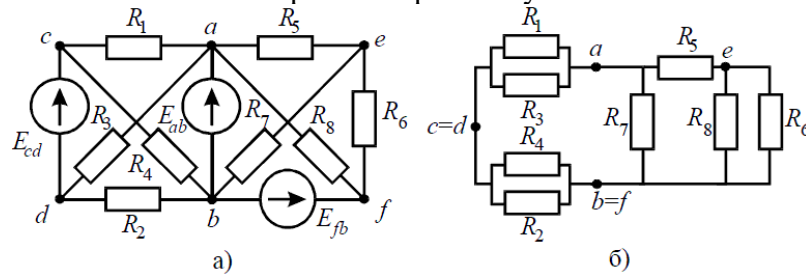


Рис. 4

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: $R_1 = 12 \text{ Ом}, R_2 = 20 \text{ Ом}, R_3 = 30 \text{ Ом}, U = 120 \text{ В}$.

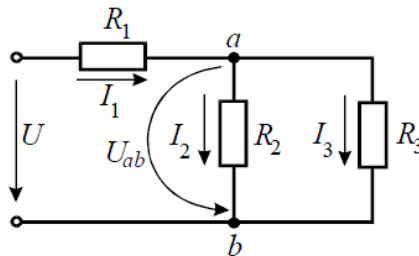


Рис. 5

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:

$$I_1 = U/R_9 = 120/24 = 5 \text{ A.}$$

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 № 5.

Тема 1.3. Расчёт электрических цепей постоянного тока.

Практическая работа по теме «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).

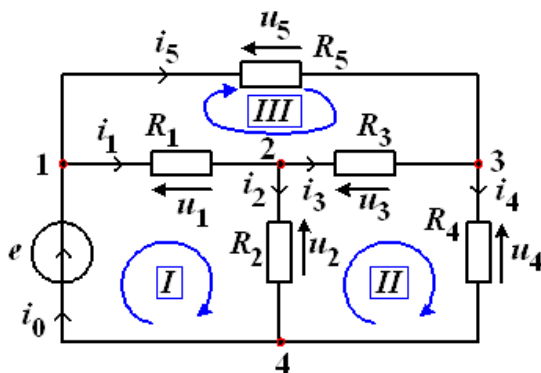


Рис. 1. 4.

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:

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

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.

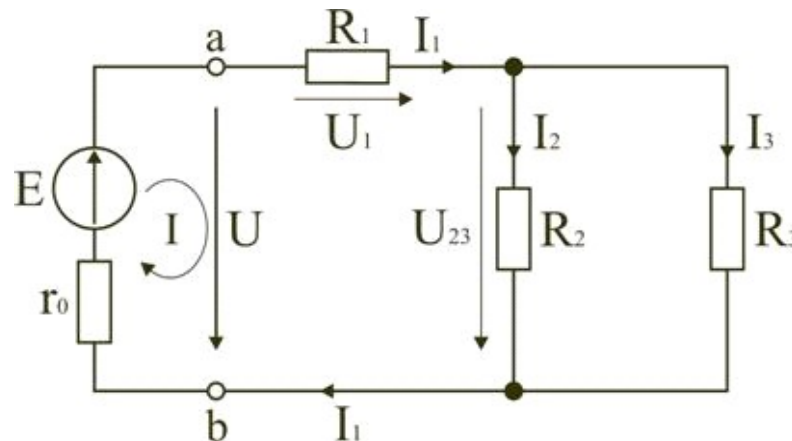


Рис. 1.25

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, отдаваемую 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 расходуется 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.

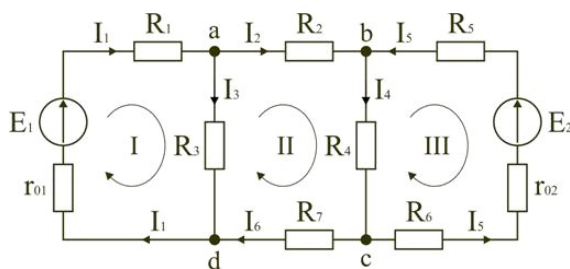


Рис. 1.26

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:

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 потребителя.

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 № 6.

Тема 1. 4. Цепи синусоидального тока.

Практическая работа по теме «Особенности функционирования электрических цепей при воздействии переменных токов и напряжений»

Цель работы: закрепить знания по теме.

Теоретическая часть:

Свойства и параметры электрических цепей при синусоидальных э.д.с. и токах
Источники и параметры синусоидальных э.д.с.

Синусоидальные э.д.с. находят широкое применение как для питания различных устройств и аппаратуры, так и в качестве входных и выходных сигналов различных электронных схем. В первом случае имеем дело с генераторами или источниками электроэнергии.

Источники синусоидальных (гармонических) э.д.с. находят на практике широкое применение как источники электрической энергии благодаря ряду достоинств синусоидальных сигналов. Выделим четыре достоинства:

- 1) простой способ формирования синусоидальной э.д.с.;
- 2) простой способ трансформации величины напряжения;
- 3) простой способ формирования вращающего электромагнитного поля с целью преобразования электроэнергии в механическую энергию;
- 4) простой способ преобразования переменного напряжения в постоянное напряжение.

Синусоидальные э.д.с. формируются с помощью электрических машин. Электрическая машина – это устройство, которое может работать или в качестве генератора электроэнергии, или в качестве электродвигателя.

Рассмотрим возможный вариант выполнения генератора синусоидальной э.д.с.. На статоре (неподвижной части электрической машины) симметрично располагаются две включенные последовательно катушки (рисунок 2.1а), а между ними на вращающемся роторе располагается постоянный магнит. При вращении постоянного магнита на катушках W1 и W2 будет наводиться э.д.с. $e(t)$, которая меняется по гармоническому закону (рисунок 2.1б):

$$E(t) \cdot \sin \omega t$$

Если постоянный магнит будет вращаться со скоростью 3000 оборотов в минуту, в катушках будет наводиться э.д.с. синусоидального вида, частота которой равна 50 Гц.

Такая конструкция не позволяет при использовании доступных постоянных магнитов получить приемлемую мощность, поэтому на роторе часто располагается катушка возбуждения, которая с помощью контактных колец питается постоянным током из внешней цепи. Эта катушка формирует электромагнит на роторе машины.

Если на статоре электрической машины расположить три катушки под углом 120° , как показано на рисунке 2.2, то получим генератор, который позволяет формировать трехфазную э.д.с..

а) б)

Рисунок 2.1

Для формируемых сигналов, показанных на рисунке 2.2, справедливы предложенные ниже выражения:

$$\sin \omega t; \quad \sin(\omega t + 120^\circ); \quad \sin(\omega t + 240^\circ)$$

Трехфазные сети в настоящее время получили широкое применение благодаря их способности просто формировать вращающиеся электромагнитные поля, а, следовательно, просто преобразования электрической энергии в механическую энергию вращающегося ротора.

Рисунок 2.2

Если использовать еще одну электромашину, которая имеет на статоре смещённые на 120° обмотки, и соответствующим образом их подключить к трехфазной сети, то в области расположения ротора образуется вращающееся магнитное поле. Если в качестве ротора использовать постоянный магнит или электромагнит, то ротор начнёт вращаться вслед за магнитным полем, стараясь сохранить скорость вращения, равную скорости вращающегося магнитного поля. В этом случае имеем дело с синхронным электродвигателем. В качестве ротора может быть использован цилиндр, выполненный из токопроводящего материала. Переменное магнитное поле будет наводить в плоскости цилиндра вихревые токи, которые приведут к формированию магнитных полюсов. Эти по-

люса, взаимодействуя с вращающимся полем, заставляют ротор вращаться в том же направлении. Поскольку причиной появления полюсов является внешнее поле, скорость вращения ротора будет меньше. Это асинхронный электродвигатель. Подобные двигатели благодаря простоте в исполнении и приемлемым характеристикам находят широкое применение. Они могут исполняться с двумя обмотками, оси которых расположены перпендикулярно друг относительно друга. Питание одной обмотки осуществляется от однофазной сети, а питание другой осуществляется от той же сети, но через конденсатор, который осуществляет сдвиг фазы питающего напряжения. Благодаря фазовому сдвигу в области ротора формируется вращающееся магнитное поле, которое увлечёт за собой ротор. Если асинхронный трехфазный электродвигатель необходимо подключить к однофазной сети, то один из его выводов подключают к сети через конденсатор. Катушки трехфазного электродвигателя могут включаться по схемам «звезда» или «треугольник», как показано на рисунке 2.3.

Рисунок 2.3

Подобным же образом, то есть по схеме «звезда» или «треугольник», могут включаться любые другие потребители электроэнергии. При питании электроэнергией, например, многоквартирных домов подводят к дому все три фазы и нулевой провод. Затем в каждую квартиру подводят нулевой провод и один из фазовых проводов. Распределяют между фазами квартиры так, чтобы нагрузка на каждую фазу была примерно одинаковая. Нагрузки при этом оказываются включены по схеме «звезда».

Предположим, что трехфазная сеть нагружена на одинаковую нагрузку по каждой фазе с активным сопротивлением R . Тогда в нулевом проводе будет течь ток, величина которого определяется из следующего выражения: $\sin \omega t$;
 $= (\sin \omega t + \sin (\omega t + 120^\circ) + \sin (\omega t + 240^\circ)) = 0$

При симметричной нагрузке и при использовании нулевого провода суммарный ток в нулевом проводе равен 0. Поэтому при передаче электроэнергии с нулевым проводом, площадь его сечения выбирается значительно меньше. В справедливости этого факта можно убедиться, если обратить внимание на высоковольтные воздушные линии электропередачи энергии. Если линия содержит четыре провода, то три из них выполнены заметно более толстым проводом. Тонким проводом подводят нулевой провод.

Если нулевого провода нет, то при асимметрии нагрузки, включенной по схеме «звезда», возникает ненулевой потенциал в общей точке нагрузки. Это может привести к тому, что фазовое напряжение у первого потребителя возрастет, а у второго уменьшится. Если асимметрия окажется слишком большой, то повышенное фазовое напряжение может вывести из строя бытовую аппаратуру.

Для преобразования (трансформации) электрического напряжения широко используются трансформаторы. Если трансформаторы используются для осуществления питания какой-либо нагрузки, то они называются силовыми.

Силовые трансформаторы обычно работают на частоте сети и при необходимости получения большой мощности нагрузки требуют большого объема трансформаторного железа. Трансформатор представляет две или больше катушки индуктивности, расположенные близко друг к другу для обеспечения максимальной индуктивной связи. Для этой же цели используются магнитомягкие сердечники с максимальной магнитной проницаемостью, которые обеспечивают максимальную индуктивную связь между катушками. Возможная конструкция и условное обозначение простейшего трансформатора предложены на рисунке 2.4.

Рисунок 2.4.

Для трансформатора справедливо:

$$= k$$

где k - коэффициент трансформации, U_1 – входное напряжение на первичной обмотке W_1 , U_2 – наведённая на вторичной обмотке трансформатора W_2 электродвижущая сила.

Под действием переменного тока первичной обмотки W_1 в сердечнике наводится переменное магнитное поле, которое, пронизывая витки обмотки W_2 наводит в ней э.д.с.. Направление наводимой э.д.с. таково, что создаваемый ею ток в нагрузке создает противодействующее магнитное поле в сердечнике, тем самым увеличивая потребляемый первичной обмоткой ток, т.е. происходит передача энергии. В некоторых случаях, если это принципиально важно, помечают точкой условное начало обмоток.

Если $k > 1$, то трансформатор повышающий, если $k < 1$, то трансформатор понижающий. Без учета коэффициента полезного действия трансформатора справедливо равенство мгновенных значений мощностей в первичной и вторичной обмотках:

$$u_1 \cdot i_1 = u_2 \cdot i_2$$

Если вторичное напряжение в два раза меньше первичного, то ток в нагрузке может быть в два раза больше, чем потребляемый от сети. Трансформатор обеспечивает гальваническую развязку нагрузки от сетевого напряжения, что уменьшает вероятность поражения электрическим током в случае понижающего трансформатора. Для переменного напряжения определяют действующее значение напряжения, среднее напряжение и амплитудное напряжение.

Определим величину действующего напряжения или действующего тока. Для этого рассчитаем среднюю мощность, рассеиваемую активным сопротивлением R под действием переменного тока за один период:

$$= \\ = =$$

где $I =$, I – действующее значение тока, – амплитудное значение тока.

Действующее значение переменного тока равно такому постоянному току, который приводит к формированию в нагрузке такой же мощности, что и переменный ток.

Аналогично сказанному, при известной величине максимального значения гармонического напряжения можно определить величину действующего значения напряжения U : $U =$. Обычно фазовое и линейное напряжения определяются величиной действующего значения фазового напряжения

обычной сети, равного 220 В. Следовательно максимальное значение сетевого напряжения равно $220\text{В} \cdot \approx 300\text{В}$. Линейное напряжение – это напряжение между двумя соседними фазами. Определим соотношение между фазовым и линейным напряжениями. Линейное напряжение можно определить как разность напряжений соседних фаз:

$$\sin(60^\circ) \sin(-30^\circ) \cdot 1.73 \sin(-30^\circ)$$

Таким образом, максимальное значение линейного напряжения в 1.73 раза больше, чем амплитудное значение фазового напряжения. Подобное же соотношение справедливо и для действующего значения фазового и линейного напряжения. Если действующее фазовое напряжение равно 220В, то действующее значение линейного напряжения равно 380В, а амплитудное значение линейного напряжения примерно равно 540В. С учётом сказанного можно заметить, что при работе с фазовым напряжением следует применять полупроводниковые приборы (например, выпрямительные диоды), способные выдержать максимальное напряжение более трёхсот вольт, а при работе с линейным напряжением приходится рассчитывать на напряжение в 540В.

Средние значения тока и напряжения определяют путём интегрирования на интервале времени от 0 до π и они равны соответственно: . Проверим сказанное, выполнив интегрирование синусоидального напряжения $u = U_m \cdot \sin \omega t$:

$$= =$$

Проблема преобразования гармонического напряжения в постоянное легко решается путём преобразования с помощью полупроводниковых выпрямительных диодов двухполярного исходного напряжения сначала в однополярное пульсирующее. А однополярное пульсирующее напряжение легко преобразуется с помощью низкочастотных сглаживающих фильтров в однополярное практически постоянное напряжение. Возможные схемные решения выпрямителей будут рассмотрены ниже.

Использование векторных диаграмм при описании синусоидальных сигналов

Синусоидальные функции времени или сигналы могут быть представлены тригонометрической формой записи, временными диаграммами, вращающимися векторами и комплексными числами.

Тригонометрическая форма записи и временные диаграммы были рассмотрены выше. Синусоидальная функция времени может изображаться также вращающимся вектором. Векторное изображение синусоидального тока с амплитудой и его связь с временной диаграммой тока показаны на рисунке 2.5.

Длина вращающегося радиуса - вектора равна амплитуде I_m синусоидальной функции времени, угол между вращающимся вектором и осью абсцисс для момента времени $t = 0$ представляет начальную фазу φ синусоидального сигнала. Проекция вращающегося радиуса - вектора на ось ординат определяет мгновенное значение синусоидальной величины. В электротехнике за положительное направление вращения векторов принято направление против хода часовых стрелок.

Рисунок 2.5

С помощью векторов можно представить несколько синусоидальных сигналов, фазовые углы между которыми соответствуют взаимному расположению сигналов в начальный (нулевой) момент времени. Такое расположение векторов соответствует установившемуся состоянию сигналов в описываемом устройстве или приборе. При этом предполагается, что анализируемое устройство

линейно. Под установившимся состоянием понимается состояние сигналов, которое установится в устройстве или приборе спустя достаточно продолжительное время после включения питания устройства. За это время после включения, которое называется временем установления переходных процессов, должны

успокоиться все нестационарные процессы, обусловленные включением устройства в произвольный момент времени. Поскольку предполагается линейность устройства, можно утверждать, что при завершении переходных процессов во всех точках устройства установятся сигналы с частотой, которая равна частоте входного сигнала или возмущения. Возникает лишь вопрос в амплитуде и фазовой задержке каждого конкретного сигнала относительно возмущающего сигнала.

Применение векторных диаграмм для описания синусоидальных сигналов позволяет использовать геометрические приёмы для выполнения расчётов.

Применим векторные диаграммы к простейшим компонентам электрических схем. Пусть возмущающим сигналом будет электрическое напряжение, приложенное к изучаемому компоненту и подчиняющееся выражению:

$$u(t) = \sin \omega t.$$

Для резистора между напряжением и током существует известная связь:

$$u = R \cdot i.$$

То есть, ток связан с напряжением через постоянный коэффициент R . Формула зависимости тока через резистор при заданном напряжении будет выглядеть следующим образом:

$$\sin \omega t = \sin \omega t$$

Векторные диаграммы для напряжения на резисторе и тока через него в данном случае будут выглядеть так, как это показано на рисунке 2.6а.

Рисунок 2.6

Для конденсатора справедлива следующая зависимость тока от напряжения на конденсаторе:

Подставив в данное выражение заданную функцию напряжения, получим после выполнения дифференцирования:

$$i \cdot \cos \omega t = U \cdot \cos \omega t.$$

Из полученного выражения можно сделать два вывода.

Во-первых, при $t=0$ ток достигает максимального значения и опережает напряжение на 90° , что показано на рисунке 2.6б.

Во-вторых, в данной формуле появилось произведение $\omega \cdot C$, которое характеризует связь амплитуды поданного гармонического напряжения и амплитуды тока. Вспомнив закон Ома, удобно ввести понятие реактивного сопротивления конденсатора или емкостного сопротивления:

С ростом частоты гармонического сигнала $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ емкостное сопротивление уменьшается, что вызовет при той же амплитуде напряжения рост тока.

Используя введенное понятие можно определить зависимость максимального значения тока от гармонического напряжения на конденсаторе при условии установившегося значения процессов:

Аналогичное соотношение справедливо и для действующих значений тока и напряжения:

$$I =$$

Для индуктивности справедлива следующая зависимость тока от напряжения:

$$i \cdot \cos \omega t = U \cdot \cos \omega t.$$

Из полученного выражения можно сделать два вывода.

Во-первых, при $t=0$ ток достигает максимально отрицательного значения и отстает от напряжения на 90° , что показано на рисунке 2.6в.

Во-вторых, в данной формуле появилось произведение $\omega \cdot L$, которое характеризует связь амплитуды поданного гармонического напряжения и амплитуды тока. Удобно ввести понятие реактивного сопротивления катушки индуктивности или индуктивного сопротивления:

$$= \omega \cdot L.$$

При росте частоты входного сигнала пропорционально растет реактивное сопротивление катушки индуктивности, уменьшается ток в цепи. То есть, поведение индуктивности с частотой противоположно поведению емкости. Следовательно, на некоторой частоте окажется справедливым равенство:

$$=.$$

Подставим значения реактивных сопротивлений:

Это равенство позволяет определить так называемую частоту резонанса, которая проявляется в схемах с параллельным или последовательным соединением конденсаторов и катушек индуктивности:

или

Используя введенное понятие индуктивного сопротивления можно определить зависимость максимального значения тока от гармонического напряжения на катушке индуктивности при условии установившегося значения процессов:

Аналогичное соотношение справедливо и для действующих значений тока и напряжения:

В качестве возмущающего сигнала можно было определить ток как функцию времени:
 $i(t) \sin \omega t$.

Но в конечном итоге были бы получены аналогичные результаты, то есть напряжение на конденсаторе отстаёт от тока на 90° , а напряжение на катушке индуктивности опережает ток на 90° .

Используя предложенное выражение для тока и формулы связи тока и напряжения для конденсаторов и катушек индуктивности, попробуйте доказать справедливость сказанного и изобразите векторные диаграммы в этом случае.

Описанное поведение напряжений и токов в реактивных элементах согласуется с известными законами коммутации для конденсаторов и катушек индуктивности. Конденсатор старается при коммутации сохранить неизменным напряжение на своих обкладках, а катушка индуктивности сохраняет неизменной величину тока, который протекал через неё непосредственно до момента коммутации. В результате напряжение на конденсаторе оказывается отстающим от тока через конденсатор, а напряжение на индуктивности опережает ток через неё.

Практическая работа № 7.

Тема 1. 4. Цепи синусоидального тока.

Практическая работа по теме «Последовательная цепь при синусоидальном сигнале»

Цель работы: систематизировать знания по изучаемой теме.

Теоретическая часть:

Последовательная цепь при синусоидальном сигнале

Рассмотрим поведение последовательной цепи при действии на неё синусоидального напряжения в установившемся режиме, то есть после завершения переходных процессов, которые могут возникнуть в момент подачи питания.

Анализируемая схема предложена на рисунке 2.7.

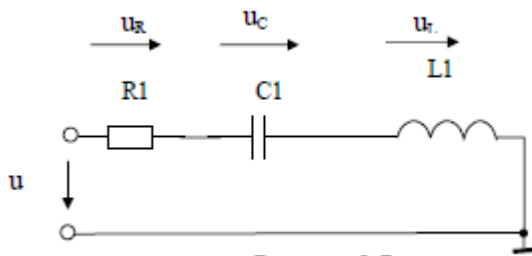


Рисунок 2.7

Рисунок 2.7

Составим дифференциальное уравнение, описывающее эту схему:

$$u = u_R + u_C + u_L = R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \cdot \int_0^t i \cdot dt + u_C(0).$$

Общее решение этого линейного дифференциального уравнения $i(t)$ складывается из частного решения $i_{уст}(t)$, которое является установившимся значением и определяется видом функции $u(t)$, и решения $i_{пер}(t)$ однородного дифференциального уравнения, которое получается в предположении $u(t) = 0$ и характерно для непродолжительного интервала времени: времени завершения переходных процессов. Переходные процессы после включения питания обычно быстро затухают. Их продолжительность зависит от возможностей входящих в схему конденсаторов и катушек индуктивности накапливать электромагнитную энергию, за счёт которой и существуют переходные процессы. А запасённой (в реальных компонентах) энергии обычно хватает в лучшем случае на секунды.

Следовательно, в реальной цепи уже через несколько секунд обычно устанавливается ток $i(t)$, равный частному решению $i_{уст}(t)$. Именно это решение представляет интерес в установившемся режиме.

При решении уравнения в этих условиях можно предположить любую начальную фазу гармонического с известной частотой входного напряжения или тока через цепь. В процессе решения независимо от предположения определяются относительные фазовые задержки, которые не зависят от исходного предположения. В последовательной цепи ток является общим для всех компонентов цепи. Целесообразно поэтому предположить, что начальная фаза тока равна нулю, то есть справедливо:

$$i = I_M \cdot \sin \omega \cdot t.$$

При таком предположении входное напряжение можно представить в виде:

$$u = U_M \sin(\omega \cdot t + \varphi).$$

Ставится задача определения взаимосвязи максимальных значений тока и напряжения и величины фазовой задержки φ для данной цепи.

Подставим формулу тока и формулу напряжения в исходное уравнение и осуществим требуемые преобразования (дифференцирование и интегрирование):

$$R \cdot I_M \sin \omega \cdot t + \omega \cdot L \cdot I_M \cos \omega \cdot t - \frac{1}{\omega \cdot C} I_M \cos \omega \cdot t + \left[\frac{1}{\omega \cdot C} I_M + u_C(0) \right] = U_M \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi)$$

Заключённая в квадратные скобки сумма является постоянной составляющей и равна нулю. Остаётся предложенное ниже уравнение:

$$R \cdot I_M \sin \omega \cdot t + \omega \cdot L \cdot I_M \cos \omega \cdot t - \frac{1}{\omega \cdot C} I_M \cos \omega \cdot t = U_M \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi).$$

Полученное уравнение справедливо для любого момента времени. Определим уравнение для двух частных случаев: $\omega \cdot t = 0$ и $\omega \cdot t = \pi/2$. При этом получим следующие два равенства:

$$\left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right) \cdot I_M = U_M \sin \varphi \quad \text{и} \quad R \cdot I_M = U_M \cos \varphi.$$

Если поделить одно уравнение на другое, то легко определить значение тангенса фазовой задержки:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}}{R}.$$

Возведя в квадрат оба уравнения, просуммировав их и учтя, что

$\sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi = 1$, получим:

$$\left[R^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right)^2 \right] \cdot I_M^2 = U_M^2.$$

Это уравнение позволяет определить связь между амплитудами тока и напряжения:

$$I_M = \frac{U_M}{z},$$

$$\text{где } z = \sqrt{R^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right)^2} - \text{полное сопротивление цепи.}$$

В полном сопротивлении цепи есть активная составляющая или активное сопротивление R и реактивная составляющая $x = x_L - x_C$. Активное сопротивление определяет необратимые процессы в цепи, в данном случае процессы превращения электроэнергии в тепло. Реактивное сопротивление определяет процессы временного перераспределения энергии между источником электроэнергии, конденсатором и катушкой индуктивности. Определив амплитудное значение тока I_M , легко рассчитать амплитуды падений напряжения на каждом компоненте электрической цепи, используя закон Ома:

$$U_{RM} = R \cdot I_M,$$

$$U_{LM} = x_L \cdot I_M, \quad U_{CM} = x_C \cdot I_M.$$

При конкретных значениях индуктивности цепи и ёмкости можно определить частоту, на которой справедливо равенство реактивных сопротивлений катушки индуктивности и конденсатора $x_L = x_C$. На этой частоте наблюдается резонанс. Заметим, что на частоте резонанса f_0 реактивное сопротивление равно нулю. Это приводит к максимальному значению тока в цепи. Во время резонанса конденсатор и катушка обмениваются энергией, почти не требуя поступления энергии из внешней среды.

Если частота сигнала выше резонансной, то индуктивное сопротивление выше, тангенс окажется положительным, то есть угол ϕ окажется больше нуля. Векторные диаграммы, соответствующие этому положению, предложены на рисунке 2.8а.

Если частота сигнала ниже резонансной, то индуктивное сопротивление меньше, тангенс окажется отрицательным, то есть угол ϕ окажется отрицательным. Векторные диаграммы, соответствующие этому положению, предложены на рисунке 2.8б.

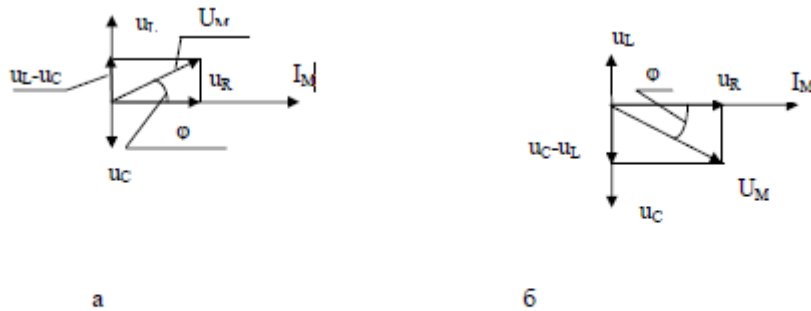


Рисунок 2.8

Взаимное расположение входного напряжения и тока в цепи можно представить и с помощью временных диаграмм, то есть зависимостями уровня сигнала от времени. Временные диаграммы для рассмотренных случаев предложены на рисунках 2.9а и 2.9б соответственно. Можно заметить, что на рисунке 2.9а ток отстаёт от напряжения, а на рисунке 2.9б – опережает напряжение.

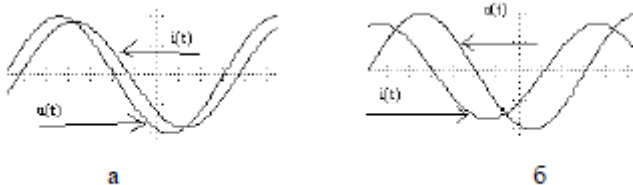


Рисунок 2.9

Вблизи резонанса могут наблюдаться интересные явления, которые требуют анализа. Попробуйте объяснить поведение предложенной на рисунке 2.10 схемы, если на её вход подаётся гармонический сигнал с амплитудой 10В при частоте 159Гц.

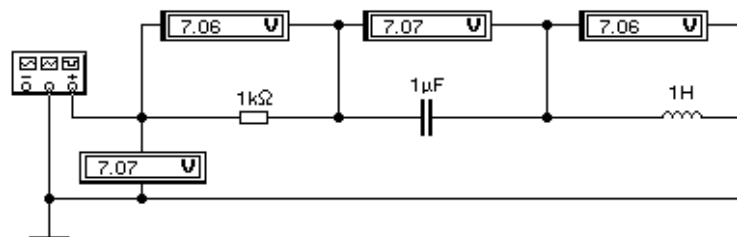


Рисунок 2.10

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:

$$p = i \cdot u.$$

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:

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

Комплексный метод расчёта электрических цепей

При определении токов и напряжений на участках электрической цепи при переменном токе решается задача определения амплитуды и фазы сигнала, то есть двух независимых параметров из трёх для гармонического сигнала. Поскольку частота воздействующего на цепь сигнала известна, проблема её определения в линейных цепях исключается: спустя время переходного процесса во всех точках линейной цепи под действием гармонического сигнала установятся сигналы синусоидального вида с частотой входного воздействия. Комплексный (или символический) метод оказывается очень удобным инструментом для расчёта электрических цепей. Действительно, комплексная переменная определяется двумя независимыми параметрами: при показательной форме записи модулем A и аргументом φ :

$$\underline{A} = A \cdot e^{j\varphi}, \quad \text{где } j = \sqrt{-1}.$$

То есть при использовании комплексных переменных решается требуемая задача определения значения двух независимых величин. С другой стороны, использование комплексного метода позволяет свести решение дифференциального уравнения к решению алгебраического. Объясняется это тем, что взятие производной от гармонического сигнала равносильно умножению комплексного изображения сигнала на величину $j\omega$, а интегрирование заменяется делением изображения функции на тот же коэффициент: $j\omega$. Обратим на это внимание.

Пусть исходная переменная задаётся током:

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi).$$

Можно заметить, что конечным результатом расчётов являются амплитудные или действующие значения представляющих интерес переменных и их фазовые задержки относительно заданного входного сигнала или друг относительно друга. Формула Эйлера для

комплексных чисел показывает, что функция вида представляет сочетание гармонических сигналов $\cos(\omega t + \varphi)$ и $\sin(\omega t + \varphi)$:

$$e^{j(\omega t + \varphi)} = \cos(\omega t + \varphi) + j \sin(\omega t + \varphi).$$

То есть можно допустить замену заданного тока функцией комплексной переменной, содержащей синусную и косинусную составляющие одновременно и ставить задачу определения амплитудных и фазовых параметров интересующих нас переменных. С учётом сказанного заданный ток в комплексном виде может быть представлен следующим образом:

$$I_M \cdot e^{j(\omega t + \varphi)} = I_M e^{j\varphi} \cdot e^{j\omega t} = \underline{I_M} e^{j\omega t},$$

где $\underline{I_M} = I_M \cdot e^{j\varphi}$ - комплексное изображение тока.

Производная от тока равна:

$$\frac{di}{dt} = \omega \cdot I_M \cos(\omega t + \varphi) = \omega I_M \sin(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}).$$

Изображение этой функции будет следующее:

$$\omega I_M e^{j\frac{\pi}{2}} e^{j\varphi} e^{j\omega t} = j \omega \underline{I_M} \cdot e^{j\omega t},$$

где учтено равенство: $e^{j\frac{\pi}{2}} = \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) + j \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) = j$.

Полученное равенство доказывает, что взятие производной в комплексном изображении равносильно умножению на произведение $j\omega$.

Интеграл от тока, в котором не учтены постоянные составляющие, равен:

$$\int_0^t i \cdot dt = \int_0^t I_M \sin(\omega t + \varphi) \cdot dt = -\frac{I_M}{\omega} \cos(\omega t + \varphi) = \frac{I_M}{\omega} \cdot \sin(\omega t + \varphi - \frac{\pi}{2}).$$

Изображение этой функции будет следующее:

$$-j \cdot \frac{I_M}{\omega} \cdot e^{j\varphi} \cdot e^{j\omega t} = \frac{I_M}{j\omega} \cdot e^{j\omega t}.$$

Деление изображения переменной на произведение $j\omega$ равносильно взятию интеграла. Используя сказанное, преобразуем предложенное в параграфе 2.1.3 дифференциальное уравнение для последовательной цепи в алгебраическое уравнение с комплексными переменными:

$$R \underline{I_M} e^{j\omega t} + j\omega L \underline{I_M} e^{j\omega t} + \frac{1}{j\omega C} \underline{I_M} e^{j\omega t} = \underline{U_M} e^{j\omega t}.$$

Исключив член $e^{j\omega t}$, получим:

$$R \underline{I_M} + j\omega L \underline{I_M} + \frac{1}{j\omega C} \underline{I_M} = \underline{U_M}$$

$$\underline{I_M} = \frac{\underline{U_M}}{\underline{Z}},$$

Из этой формулы можно выразить изображение тока в цепи:

$$\text{где } \underline{Z} = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = R + jx_L - jx_C = R + j(x_L - x_C) = R + jx$$

- комплексное изображение полного сопротивления цепи.

Рассчитаем модуль и аргумент тока в цепи. Для этого умножим числитель и знаменатель выражения для изображения тока на комплексно-сопряжённое сопротивление цепи: $R - jx$. Преобразования предложены ниже:

Учтём тот факт, что $\underline{U}_M = U_M \cdot e^{j0} = U_M$. Тогда модуль тока будет равен:

$$I_M = \frac{U_M}{\sqrt{R^2 + x^2}}.$$

Полученное выражение ранее было выведено решением дифференциального уравнения. Здесь же решение получено применением комплексного метода.

Из комплексного выражения для тока легко определить следующие равенства:

$$\cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + x^2}},$$

$$\sin \varphi = \frac{x}{\sqrt{R^2 + x^2}}$$

Для изображения сигналов в виде векторов может быть использована плоскость комплексной переменной, вид которой предложен на рисунке 2.11.

При использовании комплексного метода справедливы основные законы электротехники для изображений переменных. Применим комплексный метод к расчёту цепи, предложенной на рисунке 2.12.

Комплексное сопротивление цепи определится параллельным включением резистора и индуктивности:

$$\underline{Z} = \frac{R \cdot j\omega L}{R + j\omega L} = \frac{R \cdot j\omega L}{R + j\omega L} \cdot \frac{R - j\omega L}{R - j\omega L} = \frac{\omega RL}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \cdot \frac{\omega L + jR}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}.$$

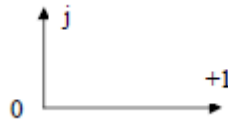
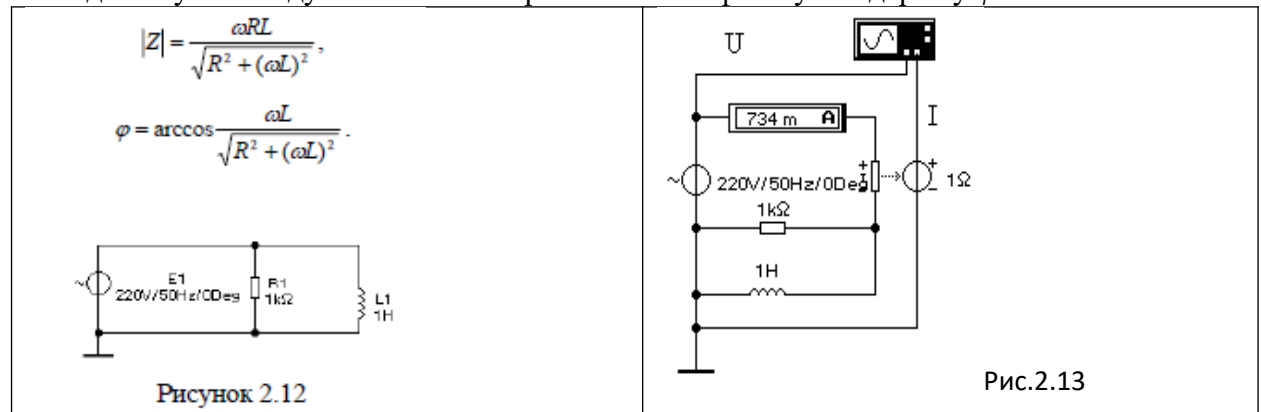


Рис.2.11

Отсюда получим модуль полного сопротивления и фазовую задержку φ :



Для предложенных на схеме значений индуктивности ($L1=1\text{Гн}$) и сопротивления резистора ($R1=1\text{КОм}$) получим следующие результаты:

$$|Z| = 299,6 \text{ Ома}, \varphi \approx 72^\circ.$$

Проверим результаты моделированием на компьютере. Схема модели предложена на рисунке 2.13, а временные диаграммы напряжения и тока предложены на рисунке 2.14.

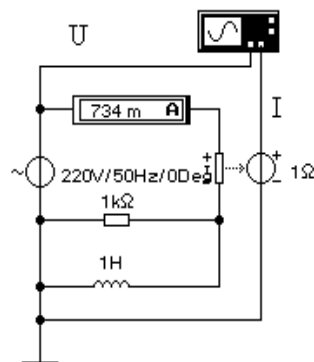


Рисунок 2.13

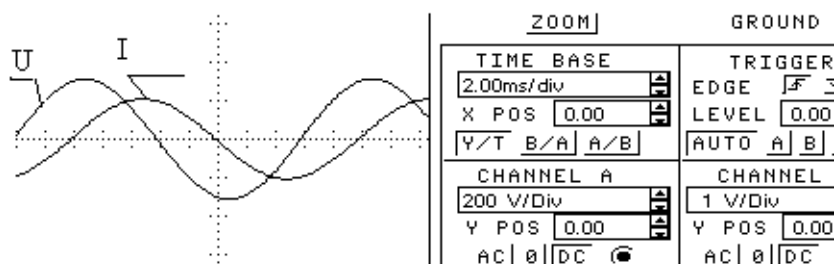


Рисунок 2.14

Рассчитаем действующее значение тока в цепи:

$$I = \frac{U}{|Z|} = \frac{220}{299,6} = 734 \text{ мА}.$$

Именно это значение тока показывает амперметр на модели схемы.

Дальнейшим развитием комплексного метода расчёта является операторный метод, который предполагает применение преобразования Лапласа.

Ход работы:

1. Ознакомиться с теоретической частью.
2. Выполнить конспект основных положений.
3. Ответить на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

Практическая работа № 8.

Тема 1. 4. Цепи синусоидального тока.

Практическая работа по теме «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.

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 = $1 \text{ гВт} = 100 \text{ Вт}$,

1 киловатт = $1 \text{ кВт} = 1000 \text{ Вт}$,

1 мегаватт = $1 \text{ МВт} = 1\,000\,000 \text{ Вт}$.

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:

$1 \text{ гектоватт} \cdot \text{час} = 1 \text{ гВт} \cdot \text{ч} = 100 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 360\,000 \text{ Дж}$,

$1 \text{ киловатт} \cdot \text{час} = 1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 1000 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 3\,600\,000 \text{ Дж}$.

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.

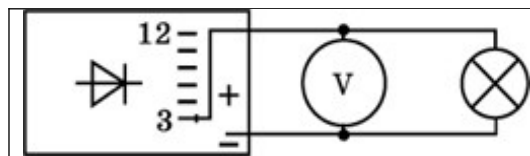


Рис. 1

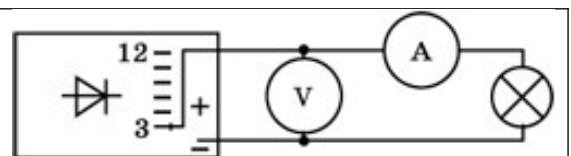


Рис. 2

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						

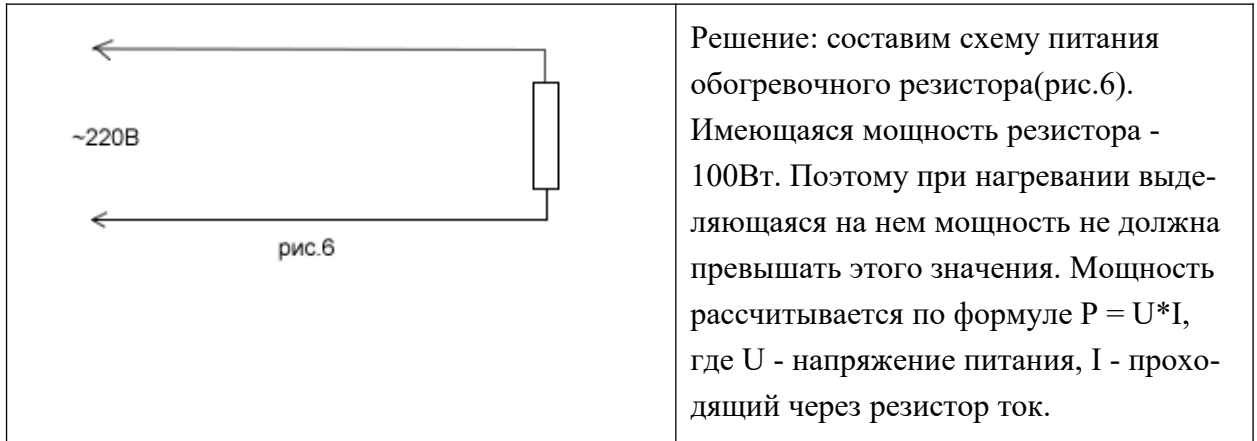
3. Перепишите с цоколя лампочки ее паспортные данные: напряжение и силу тока. Подсчитайте номинальную мощность лампочки. Запишите, чем отличается горение лампочки, когда она работает не в номинальном режиме.

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 400Ом и 620Ом использовать те, которые смогут обогревать щиток при подаче на них напряжения 220В.



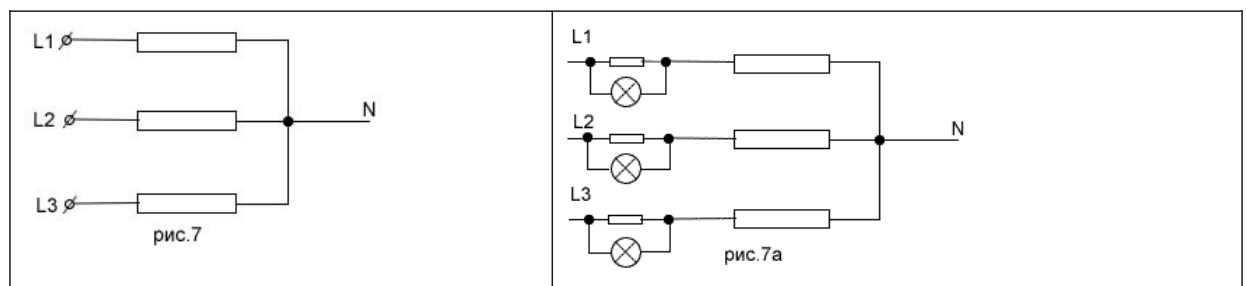
По закону Ома найдем ток, проходящий через резистор по формуле $I = U/R$. Ток через резистор номиналом 400Ом составит: $I_1 = 220/400 = 0,55$ А. Мощность, которая на нем выделяется $P = U \cdot I_1 = 220 \cdot 0,55 = 121$ Вт. Этот резистор не подойдет, т.к. реально выделяемая расчетная мощность 121Вт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

Рассчитаем ток через сопротивление номиналом 620Ом. 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 1кВт и напряжением 220В. Необходимо на щитке управления смонтировать три лампочки напряжением 1,5В, 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: $R_1 = U_1/I$, где I - величина тока в цепи, R_1 - величина искомого сопротивления, U_1 - 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: $R_1 = U_1/I = 1,5/4,55 = 0,33\text{ Ом}$. 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 $L = \frac{RS}{\rho} = 0,33 * 1,5 / 1,1 = 0,45\text{м}$. Если взять фехраль ($\rho = 1,3\text{Ом*кв. мм /м}$); необходимое сечение 1кв.мм), то длина проволоки составит $L = 0,33 * 1 / 1,3 = 0,25\text{м}$.

Задача 3. В схеме цепи даны: линейное (между фазами) напряжение

$$U_{\text{л}} = 220\text{В}; Z_A = (30 + j40)\text{Ом}; Z_B = (12 + j16)\text{Ом}; Z_C = (40 - j30)\text{Ом}.$$

Вычислить фазные токи (токи через каждую нагрузку) - , ток в нейтральном проводе -, активную P и реактивную Q мощности цепи. По данным расчета построить векторную диаграмму напряжений и токов.

Прежде, чем решать задачу надо отметить, что во всех подобных задачах (и в электротехнике в целом) комплексное сопротивление фазы - это вся имеющаяся нагрузка, подключенная к данной фазе. В данном случае на фазе А имеется активная нагрузка сопротивлением 30Ом и индуктивная (со знаком плюс) сопротивлением 40Ом. На фазе С - активная сопротивлением 40Ом и емкостная (со знаком минус) сопротивлением 30Ом.

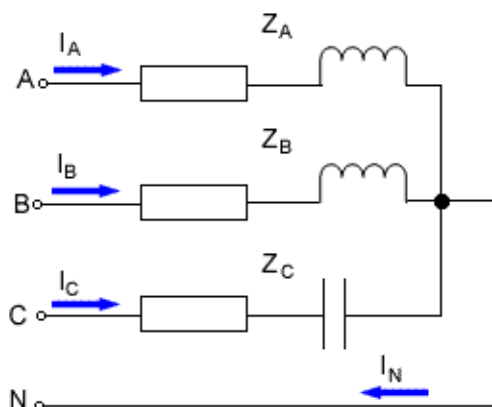


рис.8а

Решение:

1) фазное напряжение каждого приемника

$$U_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127\text{В}$$

напомним, что фазное напряжение в 3-х фазной сети - это напряжение на концах нагрузки, включенной в фазу, либо напряжение между нулем и фазой(каждой). Это одно и то же.

Тогда математически в комплексном виде напряжения каждой из фаз запишутся как:

$$U_{\phi A} = 127e^{j0^\circ} B, U_{\phi B} = 127e^{-j120^\circ} B, U_{\phi C} = 127e^{j120^\circ} B$$

степень числа e в данном случае - это есть угол каждой из фаз.

$$I_{\phi B} = \frac{U_{\phi B}}{Z_B} = \frac{127e^{-j120^\circ}}{12 + j16} = \frac{127e^{-j120^\circ}}{20e^{j53,13^\circ}} = 6,35e^{-j173,13^\circ} A$$

$$I_{\phi A} = \frac{U_{\phi A}}{Z_A} = \frac{127e^{j0^\circ}}{30 + j40} = \frac{127}{50e^{j53,13^\circ}} = 2,54e^{-j53,13^\circ} A$$

Фазные токи приемника на основании

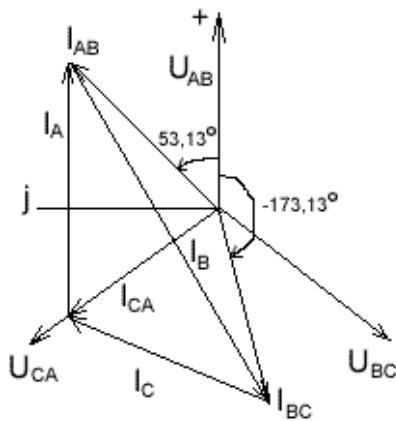
закона Ома будут равны:

$$I_{\phi C} = \frac{U_{\phi C}}{Z_C} = \frac{127e^{j120^\circ}}{40 - j30} = \frac{127e^{j120^\circ}}{50e^{-j36,87^\circ}} = 2,54e^{j156,87^\circ} A$$

Обратите внимание, что числа 2,54А, 6,35А и 2,54А - это те значения, который покажет нам амперметр переменного тока при включении в каждую из фаз, т.е. это действующие значения.

Задача 4. В 3-х фазную сеть с линейным напряжением $U_L=220V$ включен треугольником приемник, сопротивления фаз которого равны: $Z_{AB} = (30-j40) \text{ Ом}$; $Z_{BC} = (30+j40) \text{ Ом}$; $Z_{CA} = 50 \text{ Ом}$. Требуется вычислить фазные и линейные токи, найти активную и реактивную мощности 3-х фазной цепи, построить векторную диаграмму напряжений и токов.

Решение:



1. Запишем фазные напряжения источника в комплексном

виде:

$$U_{AB} = U_\phi = 220e^{j0^\circ}, U_{BC} = 220e^{-j120^\circ}, U_{CA} = 220e^{j120^\circ}$$

По закону Ома найдем фазные токи:

$$I_{AB} = \frac{U_{AB}}{Z_{AB}} = \frac{220e^{j0^\circ}}{30 - j40} = \frac{220e^{j0^\circ}}{50e^{-j53,13^\circ}} = 4,4e^{j53,13^\circ} A$$

$$I_{BC} = \frac{U_{BC}}{Z_{BC}} = \frac{220e^{-j120^\circ}}{30 + j40} = \frac{220e^{-j120^\circ}}{50e^{j53,13^\circ}} = 4,4e^{-j173,13^\circ} A$$

$$I_{CA} = \frac{U_{CA}}{Z_{CA}} = \frac{220e^{j120^\circ}}{50} = 4,4e^{j120^\circ} A$$

Линейные токи определим по первому закону Кирхгофа:

$$I_A = I_{AB} - I_{CA} = 4,4e^{j53,13^\circ} - 4,4e^{j120^\circ} = 4,84 - j0,29 = 4,84e^{-j3,43^\circ} A$$

$$I_B = I_{BC} - I_{AB} = 4,4e^{-j173,13^\circ} - 4,4e^{j53,13^\circ} = -7 - j4,05 = 8,09e^{-j150^\circ} A$$

$$I_C = I_{CA} - I_{BC} = 4,4e^{j120^\circ} - 4,4e^{-j173,13^\circ} = 2,16 + j4,34 = 4,85e^{j63,5^\circ} A$$

2. Полная мощность трехфазной цепи:

$$S = S_{AB} + S_{BC} + S_{CA} = I_{AB}^2 \times Z_{AB} + I_{BC}^2 \times Z_{BC} + I_{CA}^2 \times Z_{CA}$$

$$\text{откуда } S = 4,4^2 \times (30 - j40) + 4,4^2 \times (30 + j40) + 4,4^2 \times 50 = 2130 \text{ Вт}$$

Отсюда следует, что активная мощность $P = 2130$ Вт, а реактивная мощность $Q = 0$. Векторная диаграмма показана в начале задачи.

Практическая работа № 9.

Тема 2.1. Электрические сигналы, способы их использования, измерения и наблюдения

Практическая работа по теме «Электрические сигналы, способы их использования, измерения и наблюдения».

Цель работы: систематизировать знания по изучаемой теме.

Теоретическая часть:

Мир сигналов многообразен, а в технических приложениях сигнал представляет собой функцию определённого аргумента (информационную функцию), несущую сообщение (информацию) о физических свойствах, состоянии или поведении какой-либо физической системы, исследуемом объекте или среды. При приёме и обработке сигналов основной задачей исследователей является извлечение определенных сведений об исследуемом процессе, объекте или переданной информации, которые представлены конкретными сигналами и преобразование этих сведений в форму, удобную для восприятия и дальнейшего использования.

Сигнал характеризует взаимосвязи между определёнными величинами, и такие взаимосвязи появились как функциональные зависимости в теории математики ещё в 18-м веке.

Большое развитие функциональные зависимости получили в технике связи, радиолокации и радионавигации, где, например, для теоретических расчётов и анализе различных преобразований временных функций реальные сигналы часто идеализируют и широко используют математические модели, применяя обозначения вида $S(t)$, $f(t)$ или $u(t)$. Конкретные функциональные зависимости, полученные в виде математических моделей, позволяют исследовать свойства сигналов, определять его способность передавать необходимую информацию, обеспечивать возможность построения и функционирования различных быстродействующих, высокоточных и помехоустойчивых систем связи, радиолокации, радионавигации и многих других устройств.

Математическая модель может быть задана в виде аналитических выражений, графиков или таблиц. Одна и та же математическая модель позволит исследователю характеризовать как ток и напряжение, так и свойства линейных цепей или получить вероятностное описание случайного процесса. Примером обобщённой математической модели может служить широко распространенная функция Гаусса, представляемая в общем виде формулой: $y(x) = A_{\text{exp}} \cdot (-(x - x_0)/\Delta x)^2$, где параметр A характеризует амплитуду исследуемой функции, x - аргумент, определяющий функциональную зависимость, x_0 и Δx определяют координату максимального значения и протяжённость функции. Такая обобщённая

функция, например, позволит исследователю описать свойства сигнала во временной или частотной области и отметить характерные особенности в зависимости от изменения параметров. Для этого следует записать формулу соответствующей математической модели сигнала, характеризующего изменение, например, напряжения, как функцию времени, в виде: $s(t) = u(t) = U_m \exp(-(t-t_0)/\tau_u)$ где U_m - амплитуда исследуемого напряжения, t_0 - координата максимального значения, τ_u - длительность импульса. График рассмотренной модели функции напряжения для разных значений параметров t_0 и приведён на рис. 1.1а.

Такой же математической зависимостью можно охарактеризовать некоторые линейные цепи, представив модуль комплексной передаточной функции цепи (амплитудно-частотной характеристики - АЧХ) в виде: $|K(j\omega)| = K_0 \exp(-((\omega-\omega_0)/\Delta\omega)^2)$, где K_0 - значение АЧХ при $\omega-\omega_0=0$, а $\Delta\omega$ - полоса пропускания исследуемой цепи (протяжённость функции). График рассмотренной модели функции АЧХ для разных значений параметров ω_0 и $\Delta\omega$ приведён на рис. 1.1б.

И, наконец, эта же формула может быть использована для описания других функциональных зависимостей, например, законов распределения случайных процессов. Так, одну из основных вероятностных характеристик случайного процесса - плотность распределения, часто встречающуюся при решении различных радиотехнических задач, можно представить формулой

$$w(x) = (1/\sigma\sqrt{2\pi}) \exp[-((x-x_0)^2/2\sigma^2)]$$

где x_0 - координата экстремального значения функции, а σ^2 - характеризует интенсивность флуктуаций. Характерные графики рассмотренной модели плотности распределения $w(x)$ для разных значений параметров x_0 и σ^2 приведены на рис. 1.1с. 2

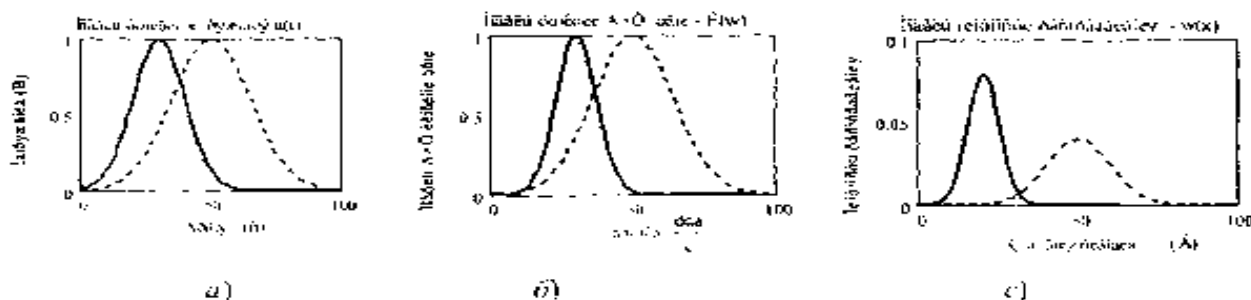


Рис. 1.1. Варианты использования одной математической модели (Гауссовой) для описания разных функциональных зависимостей

Информация, сообщение и сигнал. Сигналы при разнообразных их описаниях представляют физический процесс, содержащий в себе информацию, которую необходимо передать. Один из основателей теории информации К. Шеннон отмечал, что "Информация - послание, которое уменьшает неопределенность", т. е. неопределенность знаний об исследуемом объекте. Следовательно, в широком смысле информацию можно определить как совокупность знаний об окружающем мире. В отличие от других характеристик окружающего нас мира, информационные характеристики не уменьшаются при потреблении, а накапливаются со временем и с помощью технических средств относительно просто их можно обрабатывать, хранить и имеется возможность обмениваться информацией на значительных расстояниях.

Особенность информации состоит в том, что часто она появляется в одном месте, а может использоваться в другом. Для передачи или хранения информации используют различные знаки (символы), позволяющие выразить или представить ее в определенной форме. Этими знаками могут быть слова и фразы человеческой речи, рисунки, различные формы колебаний, математические формулы и т. д.

Очень часто наряду с информацией используются *данные*. Данные могут рассматриваться как зарегистрированные результаты эксперимента, которые по различным причинам могут не использоваться, а только храниться. Когда же появляется возможность ис-

пользования этих данных для уточнения определенных событий о чем-либо, они превращаются в информацию. Поэтому информацией можно считать используемые данные.

Информация, подлежащая передаче и выраженная в определенной форме, называется *сообщением*. Сообщение может быть представлено в форме текста телеграммы, некоторых сведений, передаваемых по телефону, факсу, радио, телевидению или телеграфу и т. д. Сообщения могут быть функциями времени, например речь при телефонных разговорах, температура, давление при передаче телеметрических данных, спектакль при передаче по телевидению и т. д. Сообщение может и не являться функцией времени (например, текст телеграммы, неподвижное изображение и пр.).

Сообщение (информация) может быть передано на какое-либо расстояние с помощью определенного материального носителя. В связи с качеством носителей сообщений используются различные сигналы

Сигнал - физический процесс (или явление), несущий информацию о состоянии какого-либо объекта наблюдения. Сигнал позволяет переносить информацию в пространстве и времени. По своей физической природе сигналы бывают электрическими, световыми, звуковыми и др. В радиотехнике используются электрические или магнитные сигналы. Так, электрический сигнал позволяет передавать сообщения во времени, то есть является функцией времени, даже если сообщение, представляет собой постоянные данные, например, неподвижное изображение, которое во времени не изменяется, то есть сигнал всегда является функцией времени.

Современная *радиоэлектроника* - это обобщенное название ряда областей науки и техники, связанных с передачей и преобразованием информации на основе использования и преобразования электромагнитных колебаний и волн радиочастотного диапазона; основными из этих областей являются: радиотехника, радиофизика и электроника.

Основная задача *радиотехники* состоит в передаче информации на расстояние с помощью электромагнитных колебаний. В более широком смысле *современная радиотехника* - область науки и техники, связанная с генерацией, усилением, преобразованием, обработкой, хранением, передачей и приемом электромагнитных колебаний радиочастотного диапазона, используемых для передачи информации на расстояние. Как следует из этого, радиотехника и радиоэлектроника тесно связаны и часто эти термины заменяют друг друга. Науку, занимающуюся изучением физических основ радиотехники, называют *радиофизикой*.

Основные параметры сигналов. Полезный сигнал также является объектом транспортировки (передачи), а техника связи - по существу техникой транспортирования сигналов по каналам связи. Поэтому целесообразно определить параметры сигнала, которые являются основными с точки зрения его передачи. Такими параметрами являются [4, 5] - *длительность сигнала* T_c , его *ширина спектра* F_c и *динамический диапазон* D_c .

Практически каждый сигнал, рассматриваемый как временной процесс, имеет начало и конец. Поэтому, длительность сигнала T_c является естественным его параметром, определяющим интервал времени, в пределах которого сигнал существует.

Ширина спектра сигнала F_c дает представление о скорости изменения сигнала внутри интервала его существования. Спектр передаваемого сигнала в принципе может быть неограниченным. Однако для любого сигнала можно указать диапазон частот, в пределах которого сосредоточена его основная (до 90%) энергия. Этим диапазоном и определяется ширина спектра полезного сигнала.

В радиотехнике и, в частности, в системах связи реальную ширину спектра передаваемого сигнала часто сознательно сужают. Это связано с тем, что аппаратура и линия связи имеют ограниченную полосу пропускаемых частот. Сужают спектр исходя из допустимых искажений сигнала. В частности, при телефонной связи требуется, чтобы речь была разборчива, и абоненты могли узнать друг друга по голосу. Для выполнения этих условий достаточно передать речевой сигнал в полосе от 0.3 до 3.4 кГц. Передача более широкого спектра речи в этом случае нецелесообразна, поскольку ведет к техническим

усложнениям аппаратуры и увеличению затрат. Точно также необходимая ширина спектра телевизионного сигнала определяется требуемой четкостью изображения. Если применяется стандарт с 625 строками, то верхняя частота спектра сигнала составляет 6 МГц. Спектр сигнала изображения много шире спектра сигнала звукового сопровождения, что существенно усложняет построение телевизионных систем по сравнению с системами звукового вещания.

Как правило, спектр модулированного сигнала шире спектра передаваемого сообщения и зависит от вида модуляции. Поэтому в теории сигналов используют такой параметр, как база сигнала

$$B_c = 2F_c T_c \uparrow$$

Или вводят более общую характеристику объём сигнала

$$V_c = T_c F_c D_c \uparrow$$

Объём сигнала дает общее представление о возможностях данного множества сигналов как переносчиков сообщений. Чем больше объём сигнала, тем больше информации можно "упаковать" в этот объём, но тем труднее передать такой сигнал по каналу связи с требуемым качеством.

И, наконец, динамический диапазон D_c - это отношение наибольшей мгновенной мощности передаваемого сигнала к той наименьшей мощности, которую необходимо отличать от нуля при заданном качестве передачи. Он выражается обычно в децибелах ($N \text{ дБ} = 20 \lg U_1/U_2$) и, например, динамический диапазон речи телевизионного диктора равен 25...30 дБ, небольшого вокального ансамбля -45...65 дБ, а симфонического оркестра - 75... 100 дБ. Во избежание перегрузок канала в радиовещании динамический диапазон часто сокращают до 35... 45 дБ.

Как правило, электрические сигналы, непосредственно отражающие сообщения, маломощны и низкочастотны. Известно, что электрические сигналы с низкими частотами не могут эффективно излучаться в свободное пространство. Передавать их непосредственно можно только по проводным или кабельным линиям (телефонная, телеграфная связь и т. д.). Для передачи информации используют специальные электрические сигналы (*переносчики сообщений*), которыми являются хорошо излучающиеся и распространяющиеся в свободном пространстве высокочастотные гармонические электромагнитные колебания (*несущие колебания*). Сами несущие колебания не содержат информации, а только ее переносят. Передаваемая по каналам связи информация закладывается в один или несколько параметров несущего колебания.

Длина волны электромагнитного колебания связана с ее циклической частотой и скоростью распространения света следующей формулой:

$$\lambda = c/f \uparrow$$

где $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ - скорость света; f - частота, Гц

В современной радиотехнике и теории связи используют электромагнитные колебания, расположенные в диапазоне частот от 10 до Гц. Электромагнитные колебания с такими частотами принято называть *радиоволнами* или просто *волнами*.

Для обеспечения устойчивой и надежной радиосвязи очень важна длина волны несущего колебания. На выбор диапазона радиоволн для конкретной системы передачи информации влияет ряд факторов, связанных с особенностью излучения и распространения электромагнитных волн; характером имеющегося в заданном диапазоне помех; параметрами сообщения; характеристиками и габаритными размерами передающих и приемных антенн.

Механизм возникновения и распространения высокочастотных электромагнитных колебаний (электромагнитных волн) достаточно сложен и до настоящего времени не имеет четкого физического обоснования, и его невозможно описать,

основываясь на привычных понятиях о постоянных электрическом и магнитном полях. Как известно из курса физики, постоянные электрические и магнитные поля не могут существовать без породивших их источников - зарядов или токов. Возбужденное же каким-либо источником переменного тока электромагнитное поле может существовать само по себе в отрыве от источника и, после излучения в виде электромагнитных волн в свободное пространство, будет распространяться в нем практически со скоростью света.

В радиовещании широкое применение нашли средние волны. В этом диапазоне осуществляется наиболее устойчивый прием, однако трудно обеспечить большую дальность (меньшая дифракционная способность по сравнению с более длинными волнами). Поэтому в этом диапазоне работает преимущественно местное радиовещание в зоне с радиусом в несколько сотен километров. Однако в России есть очень мощные станции этого диапазона, обслуживающие и большую территорию.

Диапазон коротких волн позволяет обеспечить большую дальность действия при относительно малой мощности передатчика и направленном излучении антенны. Основным недостатком этого диапазона являются так называемые замирания колебания уровня принимаемого сигнала, что приводит к искажению принятого сообщения. Исследования показали, что имеются оптимальные длины волн для различных часов суток и времени года. Короткие волны успешно применяют в радиовещании, радиотелеграфии на магистральных линиях связи, в морской и авиационной радионавигации.

Таблица 1.1

Наименования волн	Диапазон волн	Диапазон частот	Устаревшие (нерегламентированные) термины
Декамегаметровые	$10^5 \dots 10^4$ км	3...30 Гц	
Мегаметровые	$10^4 \dots 10^3$ км	30...300 Гц	
Гектокилометровые	$10^3 \dots 10^2$ км	300...3000 Гц	
Мириаметровые	100...10 км	3...30 кГц	Сверхдлинные
Километровые	10...1 км	30...300 кГц	Длинные (ДВ)
Гектометровые	1000...100 м	300...3000 кГц	Средние (СВ)
Декаметровые	100...10 м	3...30 МГц	Короткие (КВ)
Метровые	10...1 м	30...300 МГц	
Дециметровые	100...10 см	300...3000 МГц	Ультра-
Сантиметровые	10...1 см	3...30 ГГц	короткие
Миллиметровые	10...1 мм	30...300 ГГц	(УКВ)
Децимиллиметровые	1...0.1 мм	300...3000 ГГц	

Освоение высокочастотных диапазонов позволило развить такие области как телевидение и космическая связь. Благодаря распространению волн только в пределах прямой видимости и отсутствию поверхностной волны практически полностью исключены явления интерференции волн и, следовательно, искажения сообщений. Из-за высокой несущей частоты в этих диапазонах можно разместить большое число несущих, т. е. передавать большое число различных сообщений независимо друг от друга.

Большим достоинством высокочастотных диапазонов является возможность построения антенн, соизмеримых с длиной волны, только при этом условии имеет место эффективное излучение (сотовые системы связи). Применение искусственных спутников Земли позволяет эффективно ис-

пользовать распространение волн в пределах прямой видимости для построения систем связи большой дальности.

Общая характеристика радиотехнических цепей. Общая классификация цепей может быть проведена по виду аналитического описания взаимосвязи между выходными и входными сигналами. Обычно это дифференциальные уравнения n -го порядка учитывающие такие взаимосвязи и по характеру коэффициентов уравнения радиотехнические цепи подразделяются в соответствии с рис. 1.2. Линейные цепи преобразования сигналов описываются дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами, причем для них верен принцип суперпозиции, согласно которому реакция систем на сложный сигнал, состоящий из суммы простых сигналов, равна сумме реакций от каждого составляющего сигнала в отдельности. Это позволяет при известной реакции системы на гармоническое колебание с определенной частотой определить реакцию системы на любой сложный сигнал, разложив его в ряд гармоник по частотному спектру сигнала. Широкое использование гармонических функций при анализе сигналов объясняется тем, что они являются достаточно простыми ортогональными функциями [1] и определены при всех значениях t . Немаловажное значение имеет и то обстоятельство, что для гармонических функций и их комплексного представления по Эйлеру разработан мощный математический аппарат, который будет использован в дальнейшем.

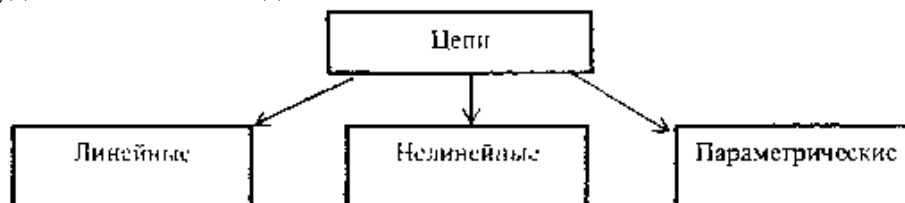


Рис. 1.2

Структура обобщенного функционального преобразования сигнала в произвольной цепи приведена на рис. 1.3.

Отмеченная на рис. 1.3 формализованная цепь представляет собой *системный оператор* (алгоритм) преобразования входного сигнала $s(t)$ - *воздействия* или *возбуждения*, в сигнал на выходе системы $y(t)$ - *отклик* или *выходную реакцию* системы. Символическое обозначение операции преобразования (трансформации сигнала - transformation) обозначается: $y(t)=T[s(t)]$.

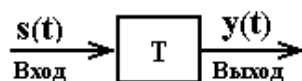


рис. 1.3

Классификация радиосистем и решаемых ими задач. В каждой радиотехнической системе используемые сигналы подвергаются различным преобразованиям. Некоторые из них являются обязательными для всех систем, независимо от назначения и характера передаваемой информации. На рис. 1.4 приведена обобщенная структурная схема произвольной системы передачи информации, из которой видно, что для большинства систем обязательны передатчик и приемник, а воздействующие помехи могут оказывать влияние не только на сигнал, сформированный передатчиком, но и на сигнал, обрабатываемый приемником.

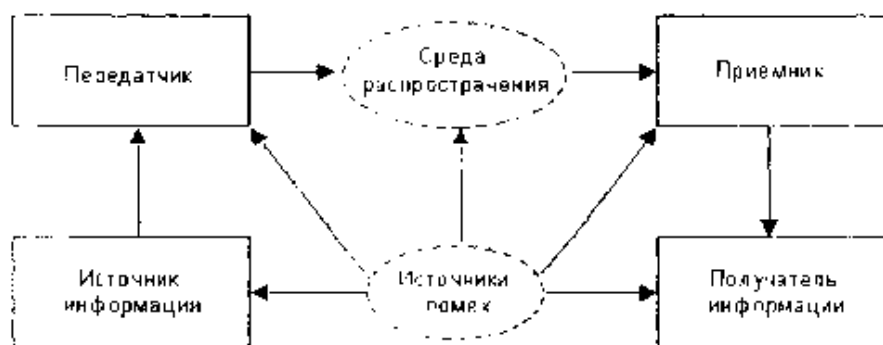


Рис. 1.4. Обобщенная структурная схема произвольной системы передачи информации

Под действием помех сигнал, проходя через канал связи, искажается. Поэтому одной из задач при организации канала связи является повышение помехоустойчивости канала. К основным задачам, относятся:

- обнаружение сигналов с учетом воздействия помех;
- различение сигналов с учетом воздействия помех;
- декодирование и оценка параметров;
- воспроизведение сообщений.

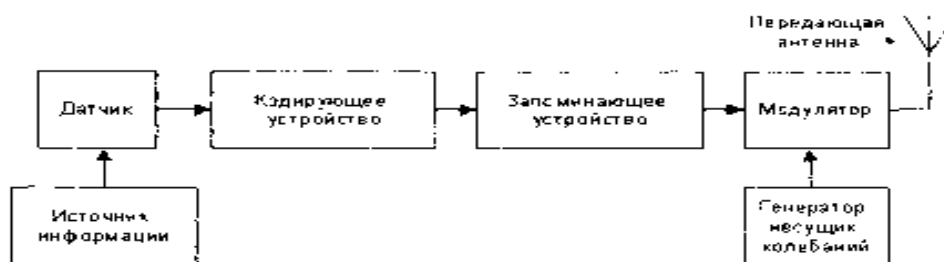


Рис. 1.5

Структурная схема передающей части канала связи представлена на рис. 1.5

На рис. 1.5 - датчик преобразовывает передаваемую информацию в электрический сигнал - сообщение. Кодирующее устройство выполняет функцию преобразования сообщения в сигнал другой формы, более пригодной для передачи. Этот сигнал часто называют управляющим.

В цифровых системах это устройство преобразует непрерывный сигнал в цифровой код. Запоминающее устройство хранит сигнал до момента его передачи. Модулятор осуществляет изменение (модуляцию) одного или нескольких параметров высокочастотного несущего колебания по закону управляющего сигнала.

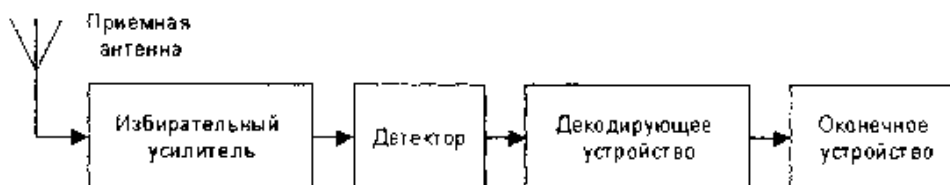


Рис. 1.6

Типовое радиоприемное устройство произвольной радиосистемы (рис. 1.6) состоит из избирательного усилителя, детектора - обеспечивающего выделение пере-

даваемого сообщения, декодирующего устройства и устройства обработки принятого сигнала (оконечное устройство).

На рис. 1.7 приведен вариант цифровой обработки сигнала цифровой радиосистемы. Фактически - это цифровой фильтр, характеристики которого можно изменять, с помощью изменения программы работы цифрового процессора (ЦП). В соответствии с рисунком можно заметить, что существенным отличием цифровой обработки от аналоговой является наличие аналого-цифрового (А/Ц) и цифро-аналогового (Ц/А) преобразователей. Временные диаграммы позволяют проследить качественный характер преобразования сигнала в отдельных блоках.

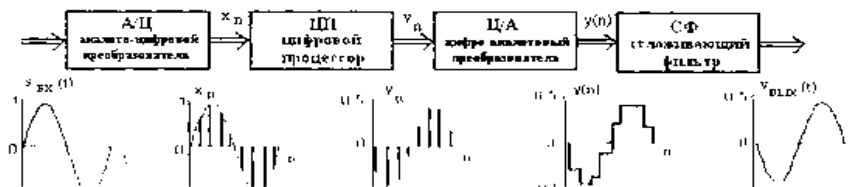


Рис. 1.7. Структура построения основных блоков цифрового приемника

Ход работы:

1. Ознакомиться с теоретической частью.
2. Выполнить конспект основных положений.
3. Ответить на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

- Сигнал представляет собой функцию определённого аргумента.....
- Сигнал характеризует взаимосвязи между определёнными величинами... Какими?
- Сигналы как физический процесс....
- Информация
- Сигнал
- Современная *радиоэлектроника* – это обобщенное название ряда областей науки и техники...
- Параметры полезного сигнала (*длительность сигнала* T_c , *его ширина спектра* F_c и *динамический диапазон* D_c , *объём сигнала*)
- Длина волн.
- Механизм возникновения и распространения высокочастотных электромагнитных колебаний. Применение.
- Общая классификация цепей.

Практическая работа № 10.

Тема 2.2. Теория сигналов и цепей.

Практическая работа по теме «Цифровые сигналы».

Цель работы: систематизировать знания по изучаемой теме.

Теоретическая часть:

Передача информации на большие расстояния реализуется в основном с помощью электрических и оптических сигналов. Объясняется это тем, что сигналы данного вида можно передавать на огромные расстояния (теоретически на любые расстояния в пределах Вселенной) с очень большой скоростью (около 3×10^8 м/с). В этом курсе рассматриваются вопросы качественного и количественного анализа только электрических сигналов. Связь представляет собой процесс передачи сообщений от источника к получателю. Сообщением называют совокупность сведений о состоянии какого-либо материального объекта. Источник и получатель сообщений разделены некоторой средой, в которой источник образует возмущения, отображающие сообщение и воспринимаемые получателем. Физическая реальность, изменения которой в пространстве и во времени отображают передаваемое сообщение, называется сигналом. Например, при разговоре источником сообщений является голосовой аппарат человека, в качестве сигнала выступает изменяющееся в пространстве и во времени воздушное давление - акустические волны; получателем служит человеческое ухо. В современном обществе для передачи различного рода сообщений широко используются электрические сигналы - электромагнитные колебания, изменения параметров которых отображают передаваемые сообщения. Электрические сигналы имеют ряд преимуществ перед сигналами другой физической природы - они могут передаваться на весьма большие расстояния, их форму можно преобразовывать сравнительно простыми техническими средствами, скорость их распространения близка к скорости света. При передаче сигналы искажаются вследствие несовершенства (неидеальности характеристик) технических устройств; кроме того, на сигналы накладываются помехи, являющиеся сторонними возмущениями различного происхождения и мешающие точному воспроизведению сообщения у получателя. Системы передачи сигналов должны быть построены так, чтобы, несмотря на искажения и помехи, сообщение восстанавливалось с заданной точностью. Для изучения систем передачи необходимо знать различные способы представления электрических сигналов и методы их анализа.

Аналоговые, дискретные и цифровые сигналы

Аналоговым сигналом в системах передачи называется непрерывный электрический или оптический сигналы $F_n(t)$, параметры которого (амплитуда, частота или фаза) изменяются по закону непрерывной функции времени источника информации, например, речевого сообщения, подвижного или неподвижного изображения и т. д. Непрерывные сигналы могут принимать любые значения (бесконечное множество) в некоторых пределах (рисунок 1.1).

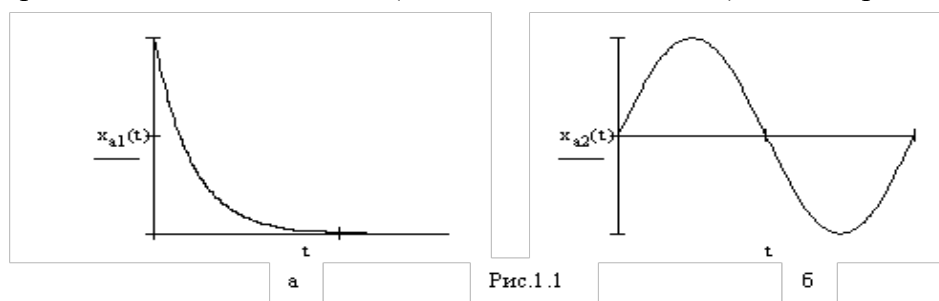


Рисунок 1.1 - Аналоговый непрерывный сигнал.

Дискретные сигналы - состоят из отдельных элементов, принимающих конечное число различных значений. Аналоговые дискретные сигналы $F_d(t)$ можно получить из непрерывных $F_n(t)$, используя дискретизацию по времени (через интервал T_d), квантование по амплитуде или по времени и по амплитуде одновременно (рисунок 1.2 а, б, в). Цифровой сигнал $F_n(t)$ формируется в виде группы импульсов в двоичной системе счисления, соот-

ветствующих амплитуде квантованного по уровню и дискретного по времени аналогового сигнала (рисунок 1.2, г), при этом наличие электрического импульса соответствует "1" в двоичной системе счисления, а отсутствие - "0". Основным преимуществом цифровых сигналов является высокая помехозащищенность, так как при наличии шумов и искажений при их передаче достаточно зарегистрировать на приеме наличие или отсутствие импульсов. Преобразование непрерывного сигнала в цифровой может осуществляться при помощи импульсно-кодовой модуляции, дельта - модуляции, дифференциальной импульсно-кодовой модуляции (ИКМ, ДМ, ДИКМ) и их модификаций. Таким образом, для получения цифрового сигнала принципиально необходимо произвести три основные операции над непрерывным сигналом: дискретизацию по времени, квантование по уровню и кодирование.

Аналоговый сигнал $f(t)$ называется **периодическим**, если существует действительное число T , такое, что $f(t+T) = f(t)$ для любых t . При этом T называется периодом сигнала.

Дискретные сигналы отличаются от аналоговых тем, что их значения известны лишь в дискретные моменты времени.

Процесс преобразования аналогового сигнала в дискретный называется **временной дискретизацией**. Процесс восстановления аналогового сигнала из дискретного называется **временной экстраполяцией**.

Цифровые сигналы представляют собой дискретные сигналы, которые в дискретные моменты времени могут принимать лишь конечный ряд дискретных значений – уровней квантования. Процесс преобразования дискретного сигнала в цифровой называется **квантованием по уровню**. Каждый из уровней квантования кодируется числом. Обычно для этих целей используется двоичное кодирование, так, что квантованные отсчеты $x_c(nT)$ кодируются двоичными числами с n разрядами. Число уровней квантования N и наименьшее число двоичных разрядов m , с помощью которых можно закодировать все эти уровни, связаны соотношением

$$m = \text{int}(\log_2 N) \quad (1.20)$$

где $\text{int}(x)$ – наименьшее целое число, не меньшее x .

Спектр сигнала - в радиотехнике это результат разложения сигнала на более простые в базисе ортогональных функций. В качестве разложения обычно используется преобразование Фурье. В радиотехнике в качестве базисных функций используют синусоидальные функции. Кроме гармонического ряда Фурье применяются и другие виды разложений: по функциям Уолша, Бесселя, Хаара, Лежандра, полиномам Чебышева и др. В цифровой обработке сигналов для анализа применяются дискретные преобразования: Фурье, Хартли, вейвлетные и др.

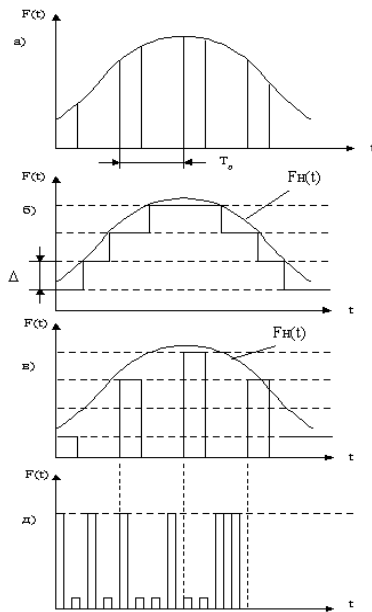


Рисунок 1.2 - Дискретные сигналы:

а) - дискретный по времени; б) - дискретный по уровню; в) - дискретный по времени и по уровню; г) - цифровой двоичный сигнал.

Спектр периодического сигнала является дискретным и представляет набор гармонических колебаний, в сумме составляющий исходный сигнал. Разложение сигнала в спектр позволяет при известной реакции системы на какой-либо простой сигнал, например, на синусоидальное колебание с определённой частотой, определить реакцию системы на любой сложный сигнал, разложив его в ряд по синусоидальным колебаниям.

На практике спектр измеряют при помощи специальных приборов – анализаторов спектра. Если под сигналом $s(t)$ понимать электрическое напряжение на резисторе сопротивлением 1 Ом, то спектр этого сигнала $S(\omega)$ можно записать следующим образом:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t)e^{-i\omega t} dt,$$

где ω - угловая частота равная $2\pi f$.

Спектр сигнала является величиной комплексной и представляется в виде: $S(\omega) = A(\omega)e^{-i\varphi(\omega)}$, где $A(\omega)$ - амплитудно-частотная характеристика сигнала, $\varphi(\omega)$ - фазо-частотная характеристика сигнала. Энергия сигнала, выделяемая на резисторе, будет равна

$$\int_{-T/2}^{T/2} |s(t)|^2 dt,$$

средняя мощность -

$$\frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} |s(t)|^2 dt.$$

Достоинство импульсно-цифровых технологий заключается не в их качестве, а в том, что можно надёжно передавать и копировать, сохранять и воспроизводить исходное состояние сигнала (не объективной реальности, она гораздо шире всех возможных систем, а именно начального сигнала), поэтому они интенсивно завоевывают информационное пространство.

Увеличение объема измерительной информации, передаваемой по каналам связи, приводит к все более широкому применению импульсной модуляции, которая имеет целый ряд преимуществ перед модуляцией гармонических колебаний. Импульсная модуляция используется в измерительно-информационных системах (ИИС) с временным разделением каналов, в которых в паузах между импульсами, несущими информацию об одной измеряемой величине, размещается информация о других измеряемых величинах. Последовательность импульсов позволяет модулировать несколько параметров сигнала, т. е. более эффективно использовать канал связи. Применение импульсных сигналов дает возможность существенно увеличить мощность в импульсе при небольшой средней мощности и тем самым повысить помехоустойчивость передачи информации.

Наиболее часто используются импульсы прямоугольной формы, которые легко формируются на основе современной электронной базы.

Контрольные вопросы

1. Какие сигналы называются аналоговыми, дискретными и цифровыми?
2. Что называется количеством информации?
3. Перечислите единицы измерения информации.
4. Что называется спектром сигнала?
5. В чем состоит преимущество передачи сигналов импульсными методами?

1. Понятие о модуляции. Виды модуляции.
2. Преобразование аналогового сигнала в цифровой вид. Импульсная модуляция. Квантование по уровню.
3. Понятие о кодировании. Разновидности кодов.

Ключевые слова

Модуляция. Дискретизация. Квантование. Код. Кодирование.

Модуляция (лат. modulator - мерность, размерность) — процесс изменения одного или нескольких параметров высокочастотного модулируемого колебания по закону информационного низкочастотного сообщения (сигнала). В результате спектр управляющего сигнала переносится в область высоких частот. Передаваемая информация заложена в управляющем сигнале. Роль переносчика информации выполняет высокочастотное колебание, называемое несущим. В качестве несущего могут быть использованы колебания различной формы (прямоугольные, треугольные и т. д.), однако чаще всего применяются гармонические колебания. В зависимости от того, какой из параметров несущего колебания изменяется, различают вид модуляции (амплитудная, частотная, фазовая и др.). Модуляция дискретным сигналом называется цифровой модуляцией или манипуляцией. Преобразование непрерывного сигнала в цифровой может осуществляться при помощи импульсно-кодовой модуляции, дельта-модуляции, дифференциальной импульсно-кодовой модуляции (ИКМ, ДМ, ДИКМ) и их модификаций. Таким образом, для получения цифрового сигнала принципиально необходимо произвести три основные операции над непрерывным сигналом: дискретизацию по времени, квантование по уровню и кодирование.

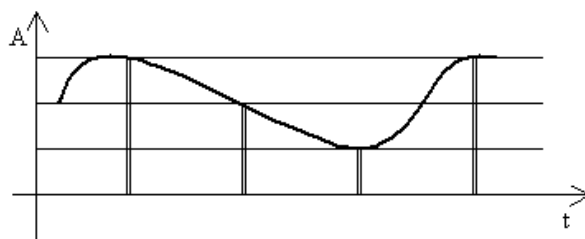
Любой дискретный или цифровой сигнал - это последовательность импульсов, следующих через равные промежутки времени. Амплитуда (высота) этих импульсов пропорциональна значениям $A(t)$ в отсчетных точках. Для цифрового сигнала характерно то, что отсчетные значения представлены в форме чисел, то есть в виде кодовых групп, состоящих из импульсов с двумя значениями амплитуд 1 и 0.

Изобразим такой цифровой сигнал во временной области - максимальный уровень - третий можно передать кодовой группой вида 11, средний уровень - вида 10, минимальный уровень - вида 00.

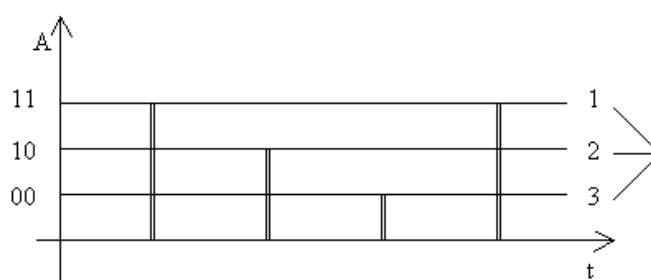
Преобразование непрерывного аналогового сигнала в дискретный может быть осуществлено в соответствии с теоремой отсчетов, доказанной В.А. Котельниковым в 1933 г.: любой непрерывный сигнал с ограниченным частотой $F_{\text{макс}}$ спектром, может быть полностью представлен в виде своих дискретных во времени отсчетов, взятых через интервал времени $T_d = 1/2 F_{\text{макс}}$, называемой периодом дискретизации. Технически операция дискретизации по времени осуществляется при помощи ключевых схем путем получения сигналов с амплитудно-импульсной модуляцией (АИМ).

Операция квантования по уровню позволяет преобразовать бесконечное множество отсчётных значений аналогового сигнала в конечное множество разрешённых уровней, перенумеровать эти уровни и передавать информацию об амплитуде отсчёта в виде двоичной кодовой комбинации с ИКМ. Для уменьшения числа разрешённых уровней квантования применяется нелинейная операция сжатия динамического диапазона сигнала.

Операция кодирования заключается в преобразовании номера "разрешённого" уровня в кодовую комбинацию двоичной системы счисления, состоящую из m символов вида "0" и "1", где величина m называется разрядностью кода. В цифровых системах преобразования с ИКМ нашли применение натуральный двоичный код и его модификация - симметричный двоичный код. Двоичные коды по времени их появления разделяются на параллельные, если сигналы кодовой группы появляются одновременно, и последовательные, если сигналы кодовой группы появляются последовательно во времени, разряд за разрядом.

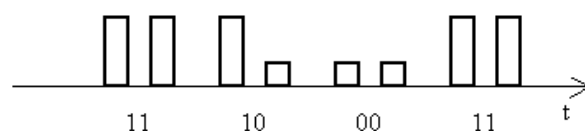


а) дискретный сигнал



Разрешенные уровни квантования

б) квантованный сигнал



в) цифровой сигнал

Виды кодов

После того, как непрерывное сообщение с помощью квантования преобразовано в дискретное сообщение, его необходимо передать по каналу связи. При этом передача должна

осуществляться без искажений или с минимальными искажениями.

Преобразование дискретного сообщения в дискретный сигнал, осуществляемое по определённому правилу, называется кодированием.

Код - это совокупность условных сигналов, обозначающих дискретные сообщения.

Для практического осуществления передачи команды нужно передавать видео- или радио- импульсы, отличающиеся друг от друга так, чтобы на приёмном конце их можно было различить и направить к своим объектам.

Двоичный код, содержащий 0 и 1, значительно увеличивает надёжность передачи, хотя длина кодового слова при этом увеличивается по сравнению с десятичным кодом.

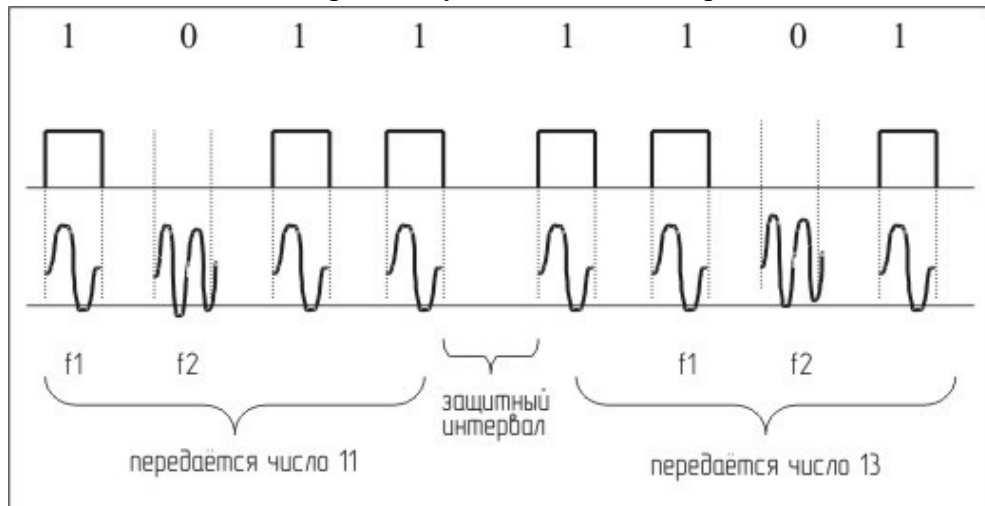


Рис.3.12. Передача кодовых комбинаций 1011 и 1101.

Схемная реализация операций с двоичными кодами выполняется с помощью устройств релейного действия, обладающих двумя устойчивыми состояниями, соответствующими 0 и 1, это: электромеханические реле, триггеры, магнитные элементы с прямоугольной петлёй гистерезиса и др.

Наибольшее распространение получил двоично-десятичный код, где каждый разряд десятичного числа записывается в виде комбинации двоичного кода, например: число 9 соответствует 1001, число 3 соответствует 0011, тогда 399 соответствует 0011 1001 1001.

Существуют другие виды кодов:

а) *единично - десятичный*, когда каждому десятичному числу присваивается определённое количество единиц (до 10). Кодовая комбинация при этом получается длинной, например число 234:

б) *число - импульсный код (единичный код)*. Кодовые комбинации, как и в предыдущем случае, отличаются друг от друга количеством единиц:

в) *код Морзе*, впервые применённый в 1844 г. В нем каждый символ представляется набором точек и тире:

- - передаётся как единица одним импульсом;
- передаётся 3-мя единицами без интервалов;
- интервал означает 0, например, сигнал SOS:

Цифры при этом получаются длинные, например, число 5: 101 <-> 101 <-> 101, т.е. 101010101.

г) *Пятиразрядный код Бодо*, в котором цифры передаются так же, как буквы:

А и 1 -> 10000

Б и 6 -> 00110

В и 13 -> 01101

Г и 10 -> 01010

д) *международный телеграфный код* (аналогичен коду Бодо):

А -> 00011 как 3 и т.д.

Б -> 11001

В -> 10011

Г -> 11010

е) *код Грея*. В нём меньше преобразований, в сложных схемах при этом производится меньше коммутаций, ток изменяется реже, следовательно, возможно меньше помех.

Таблица 3.2

десятичный	двоичный	код Грея
0	0000	0000
1	0001	0001
2	0010	0011
3	0011	0010
4	0100	0110
5	0101	0111
6	0110	0101

числа меняются в 2-х разрядах

в 3-х разрядах

число меняется только в одном разряде

Рассмотренные коды являются непомехозащищенными, т.к. одна комбинация от другой отличается всего в одном разряде:

2 -> 0010

3 -> 0011 .

Если помеха исказит первую комбинацию, то будет принят сигнал, например, 0011 вместо 0010, и не ясно, принята искажённой 1-я кодовая комбинация, то ли 2-я кодовая комбинация пришла неискажённой, определить это трудно. Для преодоления подобных трудностей применяют **помехозащищенные или корректирующие коды**. Они делятся на 2 группы:

- 1) коды с обнаружением ошибок,
- 2) коды с обнаружением и исправлением ошибок.

Эти коды позволяют обнаружить ошибки в кодовых комбинациях.

Код с проверкой на чётность

Такой код образуется путём добавления к передаваемой комбинации символов одного контрольного символа (0 или 1) так, чтобы общее число единиц в передаваемой комбинации было чётным:



На приёмном конце производится проверка на чётность. В принятых комбинациях подсчитывается количество единиц, и если оно чётное, считают, что искажений не было. Тогда последний (контрольный) символ отбрасывают и записывают начальную комбинацию. Такой код может обнаружить ошибки, кратные 3, 5 и т.д., но чётное количество ошибок обнаружить не может, и тогда передача сигнала может происходить с сильными искажениями.

По такому же принципу может быть построен код с проверкой на нечётность.

Проверка кодов осуществляется счётчиками, выполняемыми на триггерах.

В принципе место расположения контрольных символов не имеет значения: их можно записывать и после информационных символов, и перед ними, и чередуя информационные символы с контрольными. Однако произвольное расположение контрольных символов затрудняет проверку принятого кода. Широкое распространение получил **код Хемминга**, позволяющий обнаружить и исправить ошибки. Контрольные символы в нём размещают на местах, кратных 2^n , т.е. $2^0, 2^1, 2^2, 2^3, 2^4$ и т.д., а именно в позициях 1, 2, 4, 8, 16... Какой из символов должен стоять на контрольной позиции (0 или 1), определяют с помощью проверки на чётность.

Рассмотрим пример кодовой комбинации, содержащей 4 информационных символа 1101. Для ее защиты необходимо расставить контрольные символы в позициях 1, 2, 4. Обозначим информационные символы I_1, I_2, I_3, I_4 , а контрольные символы K_1, K_2, K_3 . Тогда кодовая комбинация будет иметь вид:

$$K_1 \ K_2 \ I_4 \ K_3 \ I_3 \ I_2 \ I_1 \text{ или } 1010101 \quad (3.4)$$

На приёмном конце для проверки правильности принятой кодовой комбинации используют метод проверки на чётность. Если сигнал прошёл без искажений, то сумма единиц в принятой кодовой комбинации даст 0, т.к. в соответствии с функцией неравнозначности:

$$1 \oplus 1 = 0 \quad 1 \oplus 0 = 1 \quad 0 \oplus 0 = 0 \quad 0 \oplus 1 = 1. \quad (3.5)$$

Число проверок равняется числу контрольных символов. В каждой проверке участвует только один контрольный символ. Суммируются символы, стоящие в позициях 1, 3, 5, 7, затем - 2, 3, 6, 7, далее - 4, 5, 6, 7.

В соответствии с (3.4) и (3.5) это:

$$\begin{aligned} K_1 + I_4 + I_3 + I_1 &= 0 \\ K_2 + I_4 + I_2 + I_1 &= 0 \\ K_3 + I_3 + I_2 + I_1 &= 0 \end{aligned} \quad (3.6)$$

Если сигнал прошёл с искажениями, то при проверке сумма единиц даст 1. По результату суммирования каждой из проверок составляется двоичное число, которое указывает место искажения. Например, 1-я и 2-я проверки показали наличие искажения, т.е. в результате суммирования получили единицы, а суммирование по 3-й проверке дало 0. Начиная с последней проверки, записываем двоичное число 011. Это соответствует 3 ($011 \Rightarrow 3$) и означает, что в 3-м символе кодовой комбинации, включая контрольные символы, возник-

ло искажение, значит, этот символ нужно инвертировать, т.е. исправить на противоположный: 0 на 1, или 1 на 0. После этого контрольные символы, стоящие на заранее известных местах, отбрасывают.

Функциональные узлы, используемые для преобразования кодовых комбинаций, называются кодопреобразователями. Это сложные устройства, состоящие из большого числа логических элементов И, ИЛИ, НЕ, ИЛИ-НЕ, И-НЕ и др., выполненные на интегральных микросхемах. К кодопреобразователям можно также отнести шифраторы, дешифраторы, счётчики.

Количеством информации называют числовую характеристику сигнала, отражающую ту степень неопределенности (неполноту знаний), которая исчезает после получения сообщения в виде данного сигнала. Эту меру неопределенности в теории информации называют энтропией.

Пример. Человек бросает монету и наблюдает, какой стороной она упадет. Обе стороны монеты равноправны, поэтому одинаково вероятно, что выпадет одна или другая сторона. Такой ситуации приписывается начальная неопределенность, характеризуемая двумя возможностями. После того, как монета упадет, достигается полная ясность, и неопределенность исчезает (становится равной нулю). Приведенный пример относится к группе событий, применительно к которым может быть поставлен вопрос типа «да-нет». Количество информации, которое можно получить при ответе на вопрос типа «да-нет», называется битом (англ. bit — сокращенное от binary digit — двоичная единица). Бит — минимальная единица количества информации, ибо получить информацию меньшую, чем 1 бит, невозможно. При получении информации в 1 бит неопределенность уменьшается в 2 раза. Таким образом, каждое бросание монеты дает нам информацию в 1 бит. В качестве других моделей получения такого же количества информации могут выступать электрическая лампочка, двухпозиционный выключатель, магнитный сердечник, диод и т. п. Включенное состояние этих объектов обычно обозначают цифрой 1, а выключенное — цифрой 0. Связь между количеством информации и числом состояний системы устанавливается формулой Хартли: $i = \log_2 N$, где i — количество информации в битах; N — число возможных состояний. Ту же формулу можно представить иначе: $N = 2^i$.

Группа из 8 битов информации называется байтом. Если бит — минимальная единица информации, то байт ее основная единица. Существуют производные единицы информации: килобайт (кбайт, кб), мегабайт (Мбайт, Мб) и гигабайт (Гбайт, Гб). 1 кб = 1024 байта = 210 (1024) байтов. 1 Мб = 1024 кбайта = 220 (1024 x 1024) байтов. 1 Гб = 1024 Мбайта = 230 (1024 x 1024 x 1024) байтов. Эти единицы чаще всего используют для указания объема памяти ЭВМ.

Ход работы:

1. Ознакомиться с теоретической частью.
2. Выполнить конспект основных положений.
3. Ответить на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Какие сигналы называются аналоговыми, дискретными и цифровыми?
2. Что называется количеством информации?
3. Перечислите единицы измерения информации.
4. Что называется спектром сигнала?
5. В чем состоит преимущество передачи сигналов импульсными методами?

6. Понятие о модуляции. Виды модуляции.
7. Преобразование аналогового сигнала в цифровой вид. Импульсная модуляция. Квантование по уровню.
8. Понятие о кодировании. Разновидности кодов.
9. Что называется модуляцией?
10. Перечислите виды модуляции. Чем они различаются?
11. Какие операции необходимо произвести над непрерывным сигналом для получения цифрового сигнала?
12. Что называется дискретизацией сигнала по времени? Что называется квантованием сигнала по уровню?
13. Что называется количеством информации? Назовите единицы измерения информации.
14. Что называется кодом? Перечислите виды кодов.

Практическая работа № 11.

Тема 2.2. Теория сигналов и цепей.

Практическая работа по теме «Цифро-аналоговые и аналого-цифровые преобразователи».

Цель работы: систематизировать знания по изучаемой теме.

Теоретическая часть:

Цифро-аналоговые и аналого-цифровые преобразователи

Цифро-аналоговые преобразователи (цап)

ЦАП предназначены для преобразования цифровых сигналов в аналоговые. Применяются ЦАП в качестве узлов обратной связи аналого-цифровых преобразователей и для формирования выходных аналоговых сигналов цифровых измерительных и вычислительных устройств.

Цифроаналоговым преобразователем (ЦАП) называется устройство для преобразования значения цифрового кода (двоичного числа) в пропорциональное значение аналоговой величины (напряжения). Наиболее распространены ЦАП на основе многозвенной цепи резисторов типа $R-2R$ (рис. 17.15), которая содержит резисторы $R_0 = R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 2R$, $R_{12} = R_{23} = R_{34} = R$. Резисторы R_1, R_2, R_3, R_4 через переключатели $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4$, управляемые значениями 1 или 0 соответствующих разрядов $A_1, A_2,$

A_3, A_4 кода двоичного числа, подключаются либо к инвертирующему входу операционного усилителя, либо к точке 0 с нулевым потенциалом $V_0 = 0$. При этом, полагая ОУ идеальным (15.И), т.е. напряжение на его входе $U_{вх0у} = 0$, токи в резисторах не будут зависеть от положения переключателей. Это определяет высокую точность ЦАП.

Рассмотрим работу схемы ЦАП. Резисторы и R_0 включены параллельно и имеют равные сопротивления. Их общее сопротивление при любом положении переключателя Π_i равно сопротивлению резистора R_{12} , который включен с ними последовательно поэтому потенциал точки 2 равен $V_2 = 2V_1$.

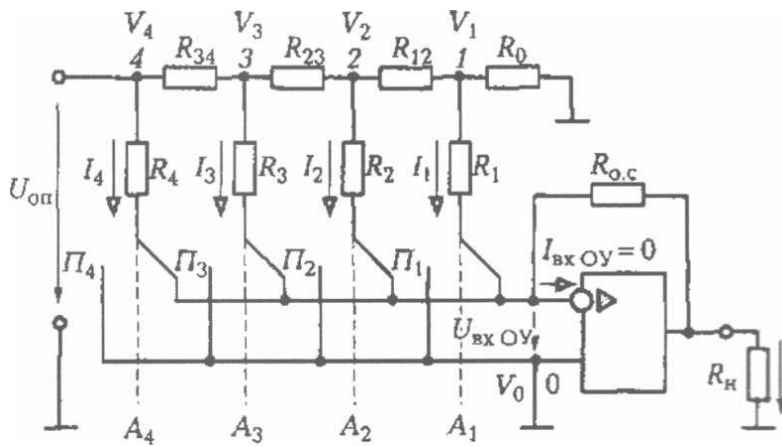


Рис. 17.15

A_3, A_4 кода двоичного числа, подключаются либо к инвертирующему входу операционного усилителя, либо к точке 0 с нулевым потенциалом $V_0 = 0$. При этом, полагая ОУ идеальным (15.И), т.е. напряжение на его входе $U_{вх0у} = 0$, токи в резисторах не будут зависеть от положения переключателей. Это определяет высокую точность ЦАП.

Рассмотрим работу схемы ЦАП. Резисторы и R_0 включены параллельно и имеют равные сопротивления. Их общее сопротивление при любом положении переключателя Π_i равно сопротивлению резистора R_{12} , который включен с ними последовательно поэтому потенциал точки 2 равен $V_2 = 2V_1$.

Рассуждая аналогичным образом, получим значения потенциалов точек 3, 4 и токов

$$V_3 = 2V_2 = 4V_1, V_4 = 2V_3 = 8V_1;$$

$$I_1 = \frac{V_1}{R_1}, I_2 = \frac{V_2}{R_2}, I_3 = \frac{V_3}{R_3}, I_4 = \frac{V_4}{R_4},$$

или

$$I_4 = \frac{U_{оп}}{R_4} = 2I_3 = 4I_2 = 8I_1,$$

где $U_{оп} = V_4 - V_0 = V_4$ — стабилизированное постоянное напряжение, называемое **опорным**. Соотношения значений токов в резисторах R_1, R_2, R_3, R_4 соответствуют «весам» разрядов кода двоичного числа A_1, A_2, A_3, A_4 , т. е. $2^0 = 1, 2^1 = 2, 2^2 = 4, 2^3 = 8$, управляемого переключателями.

Следовательно, значение напряжения на выходе ЦАП (15.16)

$$U_n \dot{=} R_{о.с} (I_1 + I_2 + I_3 + I_4)$$

Основными параметрами ЦАП являются допустимые диапазоны изменений значений входных и выходных величин, быстродействие (до 5 мкс) и погрешность преобразования. Последняя определяется нестабильностью источника опорного напряжения, неидеальностью электронных

Аналого-цифровые преобразователи

Аналого-цифровым преобразователем (АЦП) называется устройство для преобразования значений аналоговой величины (напряжения) в пропорциональное значение цифрового кода (двоичного числа с числом разрядов n). Различают параллельные и последовательные АЦП.

Параллельные АЦП основаны на одновременном сравнении значений аналоговой величины с $2^n - 1$ значениями эталонов, «веса» которых отличаются на минимальное значение (квант).

Параллельные АЦП имеют наименьшее время преобразования. Однако они сложны для интегрального исполнения, имеют высокую стоимость и ограниченное применение.

Последовательные АЦП основаны на периодическом сравнении значения аналоговой величины с последовательно возрастающей суммой значений эталонов. К последовательным относятся также АЦП с промежуточным преобразованием значения одной аналоговой величины в пропорциональное значение другой (интервал времени, частоту следования импульсов и др.) с последующим преобразованием в цифровой код.

Основными параметрами АЦП являются: допустимый диапазон преобразуемых значений напряжения (до 3 В); время преобразования (до 5 мкс для последовательных и единиц наносекунд для параллельных АЦП); погрешность преобразования, определяемая числом разрядов (обычно 4, 8, 12).

В общем виде уравнение преобразования ЦАП может быть представлено следующим образом:

$$U_{\text{вых}} = E \cdot (x_1 2^{-1} + x_2 2^{-2} + \dots + x_n 2^{-n}),$$

где $U_{\text{вых}}$ - напряжение на выходе ЦАП; E - опорное напряжение; $X \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ - цифровой код, в котором $x_1, x_2, \dots, x_n$ принимают значения логических 0 или 1.

На рис. 7.106 даны основная характеристика ЦАП и кривые, поясняющие характер погрешностей. Основная характеристика ЦАП представляет собой ступенчатую линию с постоянным значением ступеньки (шага квантования) $q_n = 1$ по оси X и

В общем виде уравнение преобразования ЦАП может быть представлено следующим образом:

Прямая, проходящая из начала координат через вершины ступенек, называется номинальной характеристикой ЦАП ($1_{\text{вых.н}}$).

Реальная характеристика ЦАП имеет некоторые отличия от идеальной основной характеристики. Так, например, угол наклона линии, соединяющей вершины ступенек реальной характеристики, не является постоянным. Наибольшее отклонение этой линии от прямой, соединяющей крайние точки этой кривой, называется интегральной нелинейностью ЦАП $\Delta U_{\text{л}}$. Разность номинальной и реальной характеристик для максимального кода N называется погрешностью полной шкалы $\Delta U_{\text{п}}$. Максимальная разность (по модулю) между значением кванта основной характеристики и квантом реальной характеристики называется дифференциальной нелинейностью $\Delta U_{\text{к}}$.

Погрешности ЦАП могут быть выражены в процентах, а также в долях кванта.

Если дифференциальная нелинейность ЦАП больше одного кванта, то зависимость выходного напряжения от входного кода может стать немонотонной. Погрешность полной шкалы, связанная с неточной установкой коэффициента преобразования ЦАП, может достигать достаточно большого значения (от 10 до 30 квантов). Однако влияние этой погрешности можно уменьшить для конкретных схем подстройкой опорного напряжения. Базовая схема четырехразрядного ЦАП представлена на рис. 7.10в. Она содержит резистивную матрицу резисторов, сопротивление которых взвешено по двоичному закону (два соседних сопротивления отличаются в 2 раза), набор аналоговых ключей АК1-АК4, цепи управления которых используются для подачи входного кода ЦАП, операционный усилитель в инвертирующем включении и резистор обратной связи R_0 . ОУ и резистор R_0 суммируют входные токи, коммутируемые цифровым кодом, преобразуя их в выходное напряжение. Если значение входного кода равно нулю, то все резисторы матрицы отключены от инвертирующего входа ОУ и подключены к нулевому проводу схемы. Таким образом, суммарный входной ток равен нулю и, следовательно, равно нулю выходное

напряжение ЦАП. Если значение входного кода равно единице, то все резисторы матрицы подключены к инвертирующему входу ОУ и суммарный входной ток максимален. При этом выходное напряжение ЦАП также максимально (по модулю):

$$U_{\text{вых,ax}} = 15 \cdot E \cdot R_0 / 8R.$$

Схема соответствующего ЦАП представлена на рис. 8.1а. Входное сопротивление матрицы для источника опорного напряжения постоянно (не зависит от значения кода), поэтому такие ЦАП имеют, по сравнению с базовой схемой, меньшую погрешность линейности. Указанные особенности предопределили преимущественное использование матриц R-2R в многоразрядных интегральных ЦАП.

Основные недостатки базовой схемы построения ЦАП определяются необходимостью применения резисторов с большим диапазоном номиналов, например 1R-1024R для 10-разрядного ЦАП. Рациональным способом уменьшения количества номиналов резисторов является использование лестничной матрицы R-2R.

Справочные данные на отечественные ЦАП можно получить, используя справочную литературу по цифро-аналоговым и аналого-цифровым преобразователям (см. Библиографический список). В табл. 8.1 приведены справочные данные на некоторые зарубежные ЦАП.

Таблица 8.1

Тип ЦАП Параметр	TQ 6112	DAC 1000	AD 7248	DAC 1230	AD 568	AD 7534	AD 569	PCM 545	DAC 729
Разрядность	8	10	12	12	12	14	16	16	18
Выход (I/U)	и	I	U	I	I	I	U	I	I
RG памяти	8	8 + 2	8 + 4	8 + 4	12	8 + 6	8 + 8	16	18
U _о , В	± 10	±25	внут.	±25	внут.	±25	±5	внут.	внут.
Время преобр., нс	1	500	5000	1000	35	1500	6000	350	300
Подстройка	-	-	-	-	+	+	-	-	+
Нелин-ть, квантов	2	1	1	0,5	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1
Дифференц.нелин-ть, квантов	1	1	1	0,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,05
U _н , В	-3,5; + 9	+ 5- 12	± 15	+ 15	± 15	+ 15; -0,3	± 12	± 15	+ 5; + 15
I _н , мА	3,5 Вт	+ 0,5	±5	+ 1,2	+ 30; - 8	±0,5	±6	± 13	18: 30
Производитель	Tri Quint	NS	AD	NS	AD	AD	AD	BB	BB

Аналого-цифровые преобразователи (ацп)

АЦП предназначены для преобразования аналоговых сигналов в цифровые. АЦП применяются в информационно-измерительных системах и измерительно-вычислительных комплексах для согласования аналоговых источников измерительных сигналов с цифровыми устройствами обработки и представления результатов измерений. В настоящее время разработано много различных методов аналого-цифрового преобразования. Этим методам соответствуют устройства, различающиеся по точности, быстродействию, помехозащищенности, сложности реализации. На самом общем уровне АЦП можно классифицировать по следующим группам (рис. 8.16):

- 1) АЦП счетного типа (последовательные);
- 2) АЦП считывания (параллельные);
- 3) Параллельно-последовательные АЦП;
- 4) Время- и частотно-импульсные АЦП.

Чтобы пояснить принципы действия АЦП первых трех групп, рассмотрим задачу измерения длины некоторого объекта, например крышки письменного стола.

Пусть длина крышки составляет 120 см.

Первый вариант измерений получается, если в нашем распоряжении имеется мера длины в виде линейки в 1 см. Чтобы реализовать измерение, необходимо приложить к крышке стола мерную линейку последовательно 120 раз. Максимальная погрешность измерения в

этом случае будет составлять $\pm 0,5$ см.

Второй вариант измерений получается, если имеется мера длины в виде линейки в 150 см с ценой деления 1 см. В этом случае измерение реализуется за один прием (параллельно) прикладыванием мерной линейки к крышке стола и отсчетом длины с погрешностью также не более $\pm 0,5$ см. Ясно, что при одинаковой точности измерений во втором случае время измерения в 120 раз меньше, однако требуется более сложное измерительное устройство (мерная линейка большой длины).

Третий вариант имеет место, когда измерительное устройство представляет собой набор мерных линеек разной длины без промежуточных делений. Предположим, что длины этих линеек соответственно составляют 100, 50, 25, 12,5, 6,25 и 3,125 см. Процесс измерений реализуется поочередным прикладыванием мерных линеек указанной длины, начиная с наибольшей. Алгоритм подбора длин линеек состоит в следующем. Сначала прикладывается линейка наибольшей длины и производится сравнение L_x и L_1 . Если измеряемая длина L_x больше длины L_1 первой линейки, то к первой линейке прикладывается вторая и вновь производится сравнение L_x с суммой $L_1 + L_2$. Если измеряемая длина L_x больше длины $L_1 + L_2$, то добавляется третья линейка. В противном случае вторая линейка убирается и к первой линейке прикладывается третья.



Рис. 8.1

Процесс подбора заканчивается, когда разность между L_x и суммарной длиной всех приложенных линеек станет меньше половины длины самой короткой из линеек. Подбор линеек сопровождается кодированием (если линейка приложена, то ставится символ логической 1, в противном случае - логического 0). Для указанного набора линеек получим $L_x = 1 \cdot 100 + 0 \cdot 50 + 0 \cdot 25 + 1 \cdot 12,5 + 1 \cdot 6,25 + 0 \cdot 3,125 = 118,75$ см, погрешность 1,25 см и код 100110. На рис. 8.2а показана временная диаграмма алгоритма последовательных приближений применительно к рассмотренной задаче. Время, затраченное на получение данного результата, составляет 6 шагов, что в шесть раз больше, чем при параллельном, но в 20 раз меньше, чем при последовательном кодировании. Погрешность может быть уменьшена введением дополнительного разряда (линейки с длиной 1,5625 см) без существенного увеличения времени измерения.

Таким образом, параллельно-последовательные АЦП представляют собой разумный компромисс в координатах быстродействие - сложность между АЦП счетного типа (как самыми простыми) и АЦП считывания (как самыми быстродействующими). Параллельно-последовательные АЦП, называемые также АЦП последовательного приближения, нашли широкое использование в схемотехнике как в виде полностью законченных ИМС, так и в виде набора отдельных узлов, выполненных также по интегральной технологии.

АЦП последовательного приближения. Структурная схема АЦП последовательного при-

ближения дана на рис. 8.26. АЦП содержит компаратор. ЦАП с источником опорного напряжения, выходной регистр данных и устройство управления. В структурном отношении данный АЦП представляет собой систему с ООС. Обратная цепь образована ЦАП, выходное напряжение которого сравнивается с входным напряжением на компараторе. Логика последовательных приближений реализуется регистром последовательных приближений (РПП), выходной код которого управляет работой ЦАП и через выходной регистр (РД) может быть сосчитан во внешнюю цепь. Устройство управления (УУ) синхронизирует работу отдельных блоков АЦП, а также управляет по запросам извне работой выходного регистра. Широкое распространение однобайтных микропроцессоров вызвало разработку восьмиразрядных АЦП последовательного приближения. Таковыми, в частности, являются АЦП типов К572ПВ3 и К572ПВ4.

Схема включения АЦП К572ПВ3 показана на рис. 8.2в. Время преобразования этого АЦП составляет 7,5 мкс, ток потребления от одного источника питания 5 В равен всего 5 мА. АЦП имеет два одинаковых входа АН и АІ2, соединенных внутренними резисторами с одним и тем же входом компаратора. На этот же вход компаратора подается выходной ток ЦАП, управляемого РПП. Таким образом, АЦП обеспечивает преобразование в код суммы напряжений, подаваемых на входы АІ1 и АІ2. При практическом использовании этого АЦП на вход АІ1 подают входное напряжение $U_{вх}$, а на вход АІ2 - напряжение регулировки смещения нуля. Управление работой АЦП осуществляется с помощью сигналов, подаваемых на входы CS (выбор кристалла) и RD (чтение).

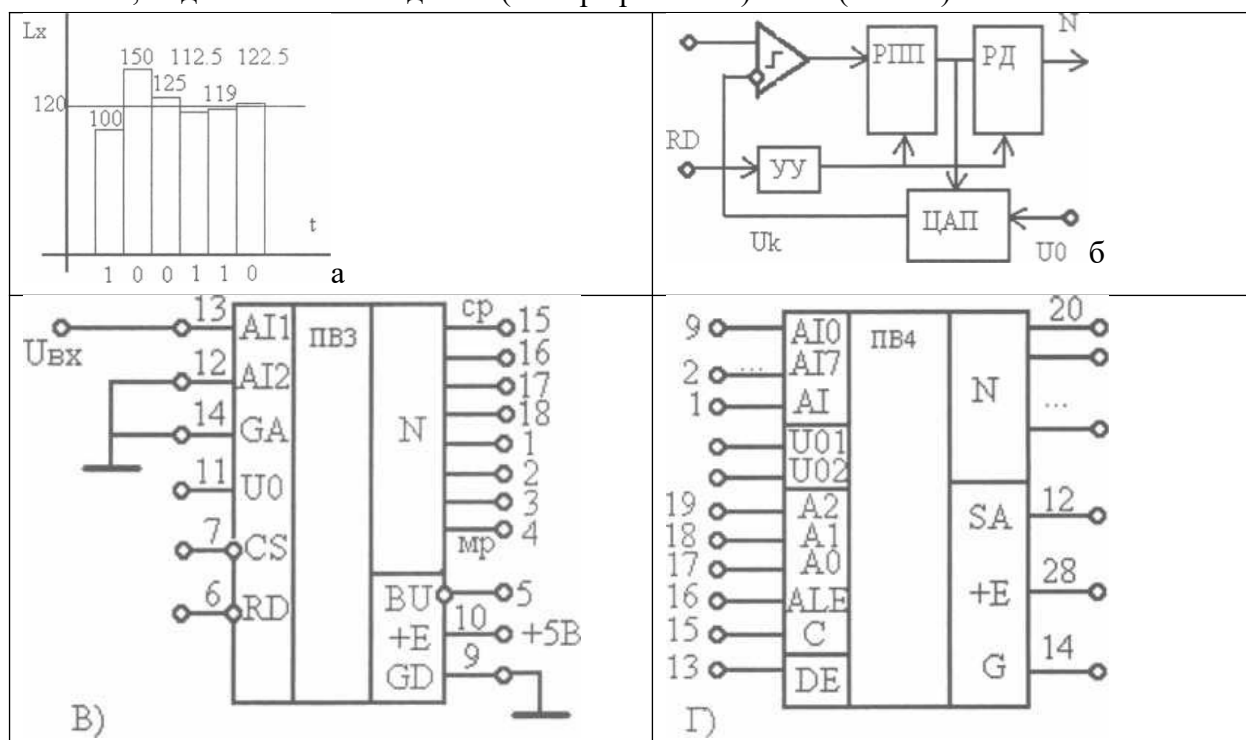


Рис. 8.2

Если $CS = 0$, то переход из 0 в 1 на входе RD обусловит сброс и запуск АЦП. Если $CS = 1$, то переход из 0 в 1 на входе RD вызовет только сброс, а запуск произойдет по спаду 1 в 0 на входе CS. Когда осуществляется процесс преобразования, на выходе BU = 0. Выходные данные существуют при сочетании сигналов $CS = 0$, $RD = 0$ и $BU = 1$. Если такого сочетания нет, то выход РД находится в высокоимпедансном состоянии.

Восьмивходовый восьмиразрядный АЦП К572ПВ4 (рис. 8.2г) представляет собой многоканальную систему сбора данных. С помощью аналоговых ключей встроенного коммута-

тора восемь входных аналоговых сигналов поочередно подаются на вход АЦП последовательных приближений. Результаты преобразования записываются во встроенное оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) объемом 8 однобайтных слов. Каждому из входных каналов (AI0-AI7) соответствует своя область памяти, так что после одного цикла работы коммутатора в ОЗУ хранится информация по всем восьми каналам.

Вывод AI может использоваться как некоммутируемый вход АЦП при его применении в одноканальном режиме. В этом случае в ОЗУ будут запоминаться коды, соответствующие восьми последовательным значениям входного сигнала. Считывание информации из ОЗУ может осуществляться в произвольном порядке. Номер канала ОЗУ, информация из которого поступает на выход N микросхемы, определяется сигналами, подаваемыми на адресные входы AO, A1, A2, при наличии сигнала логической 1 на входе ALE. В момент перехода сигнала на входе ALE из 1 в 0 фиксируется заданный в этот момент на адресных входах номер подсоединенного к выходу канала ОЗУ и далее этот номер сохраняется в течение всего времени, пока ALE = 0. Диапазон преобразуемого сигнала составляет 2,5 В и может быть смещен как в положительную, так и в отрицательную область значений с помощью двух опорных напряжений (U01, U02). В компараторе АЦП сравниваются напряжения, а не токи, поэтому данный АЦП имеет большое входное сопротивление. Привязка результата преобразования по каждому из каналов к определенному моменту времени производится по сигналу состояний, формируемому на выводе SA.

Интегрирующие АЦП. Наиболее точные АЦП строятся с использованием время- и частотно-импульсного преобразования интегрирующего типа. Хотя интегрирующие АЦП уступают по быстродействию преобразователям последовательного приближения, вместе с тем они имеют и явные преимущества: минимальное число необходимых точных компонентов, высокую помехоустойчивость, отсутствие дифференциальной нелинейности, низкую стоимость. Интегрирующий АЦП, как правило, состоит из двух преобразователей: преобразователя напряжения или тока в частоту или в длительность импульсов и преобразователя частоты или длительности в код. Задача построения точного цифрового измерителя частоты или длительности импульсов решается просто: производят подсчет импульсов измеряемой частоты за известный промежуток времени или подсчет импульсов известной частоты, заполняющих измеряемый промежуток времени. Поэтому основные характеристики интегрирующих АЦП определяются свойствами применяемых преобразователей напряжение-частота (ПНЧ) или преобразователей напряжение-время (ПНВ). Наиболее распространенными типами подобных преобразователей являются: 1) ПНВ двухтактного интегрирования; 2) ПНЧ с заданной длительностью одного такта.

АЦП двухтактного интегрирования. Упрощенная функциональная схема АЦП приведена на рис. 8.3а.

АЦП содержит аналоговый ключ (АК), интегратор на ОУ, компаратор К, генератор тактовых импульсов ГТИ, логический элемент И, счетчик импульсов СИ, источник опорного напряжения (ИОН), устройство управления (УУ). Принцип действия АЦП двухтактного интегрирования заключается в следующем.

В течение первого такта, длительность T_0 которого строго задана, происходит интегрирование входного измеряемого напряжения. В конце первого такта напряжение на выходе интегратора достигает значения

$$U_{и1} = U_{вх}T_0/\tau,$$

где $\tau = RC$ — постоянная времени интегратора.

АК под воздействием сигнала управления переключается на интегрирование опорного

напряжения U_0 , имеющего противоположную к $U_{вх}$ полярность. Напряжение на выходе интегратора уменьшается от значения $U_{н1}$ до нуля за время $T_x^0 = \tau U_{н1} T_0 / U_0$. Отсюда имеем уравнение преобразования

$$T_x^0 = U_{вх} T_0 / U_0.$$

Цифровая часть построена таким образом, что задание интервала T_0^0 и измерение интервала T_x^0 осуществляются от одного и того же ГТИ.

Окончательно для выходного кода АЦП двухтактного интегрирования имеем.

$$T_0^0 = N_0 / F_0; T_x^0 = N_x / F_0.$$

Анализ полученного уравнения преобразования показывает, что точность преобразования определяется в первую очередь точностью и стабильностью ИОН и не зависит от параметров интегратора. Важнейшим практически полезным свойством АЦП двухтактного интегрирования является его высокая помехоустойчивость к сетевым помехам. Для этого длительность первого такта T_0 выбирается равной (или кратной) периоду напряжения сети 50 Гц, т. е. $T_0^0 = 20$ мс.

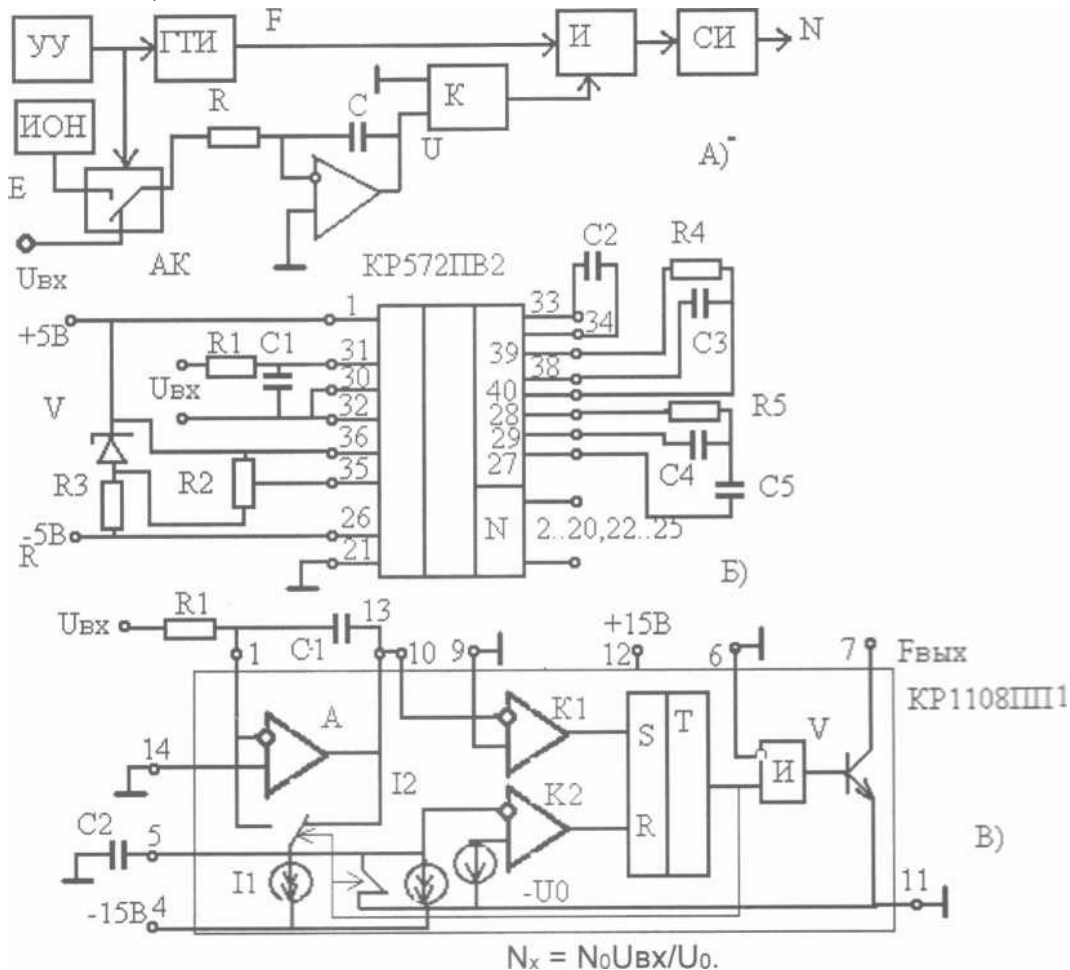


Рис. 8.3

Анализ полученного уравнения преобразования показывает, что точность преобразования определяется в первую очередь точностью и стабильностью ИОН и не зависит от параметров интегратора. Важнейшим практически полезным свойством АЦП двухтактного интегрирования является его высокая помехоустойчивость к сетевым помехам. Для этого длительность первого такта T_0 выбирается равной (или кратной) периоду напряжения сети 50 Гц, т. е. $T_0^0 = 20$ мс.

Примером подобного АЦП служит ИМС КР572ПВ2(ПВ5), в котором введена дополнительная функция автоматической коррекции напряжения смещения нуля ОУ. Цифровая часть АЦП организована так, чтобы к микросхеме можно было бы непосредственно подключать десятичные четырехразрядные семисегментные светодиодные (КР572ПВ2) или жидкокристаллические (КР572ПВ5) индикаторы. Линейность функции преобразования в значительной степени зависит от качества конденсатора интегратора. При использовании конденсаторов с полипропиленовым диэлектриком (конденсаторы типа К73П-7, К73-16) можно реализовать нелинейность на уровне 0,001 %. На рис. 8.36 приведен один из вариантов подключения входных цепей к АЦП КР572ПВ2(ПВ5). Здесь входной сигнал предварительно фильтруется от высокочастотных помех RC-фильтром.

Опорное напряжение задается параметрическим стабилизатором на стабилитроне V и резисторе R1. С помощью R2 производится точная установка опорного напряжения на уровне 0,2 В или 2 В. В стандартном включении АЦП КР572ПВ2(5) имеет следующие параметры: время преобразования 70 мс; нелинейность $\pm 0,03$ %, напряжение питания ± 5 В, потребляемую мощность 10 мВт.

Справочные данные на отечественные АЦП можно получить, используя справочную литературу по цифро-аналоговым и аналого-цифровым преобразователям (см. Библиографический список).

Справочные данные на некоторые зарубежные АЦП приведены в табл. 8.2.

Таблица 8.2

Тип АЦП	ADC 80	AD 7672	AD 9003	TLC 1205B	ADC 71	TSC 850	CSZ 5316	AD 1170	AD 1175K
Параметр									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Разрядность	12	12	12	13	16	15	16	18	22
УВХ, В	0-5; 0-10; ± 5 ; ± 10	0-5; 0-10; ± 5 ; ± 10	0-5	± 5	0-5; 0-10; ± 5	0-2U _о	$\pm 2,75$	± 5	± 5
U _о , В	внут. 6,3	внеш - 5	внут. 5	внеш. 10	внут. 6,3	внеш1,6; 0,025	внут. 2,75	внут. 5	внут. 5
Диф. вход	-	-	-	+	-	+	-	-	+
Время преобр., мкс	25	3	1	10	50	25000	50	1000	50000
Подстройка	+	-	-	-	+	+	-	-	-
Нелин-ть, квантов	2	2	1	1	0,5	0,2	0,1	0,2	0,5
Дифференц.нелин-ть, квантов	2	1	1	0,5	0,5	0,2	0,1	0,2	0,5
U _п , В	5; ± 12	5;-12	5; ± 12	± 5	± 5	± 5	± 5	5; ± 15	5; ± 15
I _п , мА	11; 5; -21	7; - 12	320; ± 60	± 3	70; ± 20	± 2			
Тактовый генератор	внут	внеш. RC	внут.	внеш.	внут.	внеш.	внеш.	кварц	внут.
Выход	посл.	пар.	пар.	пар.	посл.	пар.	посл.	пар.	пар.
Производитель	BB	AD	AD	TI	AD	TS	CR	AD	AD

В табл. 8.1,8.2 для обозначения фирм-изготовителей микросхем приняты следующие обозначения: AD - Analog Devices; BB - Burr-Brown; CR - Crystal Semiconductor; NS - National Semiconductor; TI - Texas Instruments; TS - Teledyne Semiconductor.

ПНЧ с заданной длительностью такта. Упрощенная функциональная схема этого ПНЧ (КР1108ПП1) показана на рис. 8.3в. ИМС ПНЧ содержит ОУ А, два компаратора К1 и К2, RS-триггер, два источника стабильных токов И1 и И2, два аналоговых переключателя S1 и S2, источник опорного напряжения U_о, логическую ячейку И и выходной транзистор V.

Для построения ПНЧ микросхему следует дополнить двумя конденсаторами C1 и C2 и двумя резисторами R1, R2. Компараторы K1 и K2, RS-триггер, ключ S2, конденсатор C2 и источник тока I2 образуют одновибратор (генератор одиночных импульсов).

Под действием положительного входного напряжения напряжение на выходе интегратора А уменьшается. RS-триггер при этом находится в состоянии 0, ключи находятся в состоянии, показанном на рис. 8.3в. Когда напряжение на выходе интегратора уменьшится до нуля, срабатывает компаратор K1 и переводит триггер в 1, запуская тем самым одновибратор. При этом ключ S2 размыкается и под влиянием тока I2 начинает уменьшаться напряжение на конденсаторе C2. Когда это напряжение достигнет уровня опорного напряжения U_0 , сработает компаратор K2 и RS-триггер снова возвращается в состояние "0".

Пока триггер находился в "1", ток I2 поступал на вход интегратора, вследствие чего напряжение на выходе интегратора снова возросло. Уравнение преобразования ПНЧ имеет вид $F = U_{BX}I_2/(U_0II R1 C2)$.

Номинально токи I1 и I2 равны, поэтому $F = U_{BX}/(U_0 R1 C2)$. Опорное напряжение ($U_0 = -7 В$) имеет температурный коэффициент $75 \cdot 10^{-6} 1/^\circ C$, для компенсации этой погрешности целесообразно подобрать элементы R1, C2 так, чтобы температурный коэффициент произведения составлял $-75 \cdot 10^{-6} 1/^\circ C$.

Рекомендуемые номиналы внешних элементов: R1 = 10 кОм; C1 = 4 нФ; C2 = 1,4 нФ. В этом случае при $U_{BX} = 0-2 В$, $F = 0-20 кГц$ погрешность линейности не превышает 0,01 %.

ПНЧ содержит выходной каскад с открытым коллектором, что позволяет согласовывать уровень выходного сигнала с уровнями последующих цифровых цепей.

Ячейка И позволяет закрывать выходной транзистор путем подачи на вывод 6 микросхемы напряжения логической "1" (2,5 В и более). Благодаря этому оказывается возможным подключать выходы нескольких ПНЧ к одной линии путем объединения коллекторов выходных транзисторов.

Микросхему КР1108ПП1 можно использовать в качестве преобразователя частота-напряжение (ПЧН). В этом случае импульсы входной частоты подаются на запуск входящего в микросхему одновибратора, а выходное напряжение получится пропорциональным среднему току, поступающему от источника тока I1 на вход ОУ.

Ход работы:

1. Ознакомиться с теоретической частью.
2. Выполнить конспект основных положений.
3. Ответить на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Дайте определения двоичной системы счисления, бита и байта.
2. Назовите основные признаки логических автоматов с памятью и без памяти.
3. Перечислите типы запоминающих устройств.
4. Какие функции выполняют аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи информации?
5. Приведите примеры логических автоматов с памятью и без памяти.

Практическая работа № 12.

Тема 2.2. Теория сигналов и цепей.

Изучение органов управления цифрового осциллографа.

Цель работы: Формирование навыков работы с цифровым осциллографом

Перечень используемого оборудования: цифровой осциллограф *ADS-2111M*.

Теоретическая часть:

Принцип действия и структурная схема цифрового осциллографа.

В электронно-лучевом осциллографе использован аналоговый способ создания изображения исследуемого сигнала на экране ЭЛТ. В осциллографах с цифровыми измерительными блоками этот принцип не меняется – цифровая часть выполняет только функции создания эталонного изображения (электронных меток). Принцип осциллографирования, основанный на преобразовании аналогового сигнала в поток цифровых данных, запоминаемый в ОЗУ и отображаемый на экране в виде массива светящихся точек, получил название цифровой осциллографии, а соответствующие ему приборы – цифровыми осциллографами (ЦО). Преобразование мгновенных значений сигнала в цифровые коды и сохранение их в блоке памяти позволяет решить ряд задач, недоступных аналоговым осциллографам:

Возможность работы ЦО с одиночными и случайными сигналами, которые запоминаются и затем выводятся на экран. Именно поэтому ЦО часто называют цифровыми запоминающими осциллографами – *Digital Storage Oscilloscope (DSO)*.

Достижение высокой точности измерения напряжения и временных интервалов, характерной для цифровых приборов;

Увеличение полосы пропускания путём использования современных быстродействующих АЦП; Расширение возможностей синхронизации и запуска;

Проведение косвенных измерений с индикацией результатов на экране;

Подключение к измерительным системам.

Особенностью построения ЦО является разделение блоков оцифровки входного сигнала и блоков построения изображения на экране. В них отсутствует сквозной тракт прохождения сигнала от входа до индикатора. При этом упрощается построение широкополосных входных усилителей, так как от них не требуется больших выходных напряжений, что необходимо в традиционном ЭЛО. Построение изображения производят программным способом. Быстродействие ЦО ограничивается, в основном, возможностями АЦП. Для его повышения приходится использовать АЦП с небольшой разрядностью, что приводит к появлению на экране заметных шумов квантования. Обобщенная структурная схема цифрового осциллографа представлена на рис. 18.

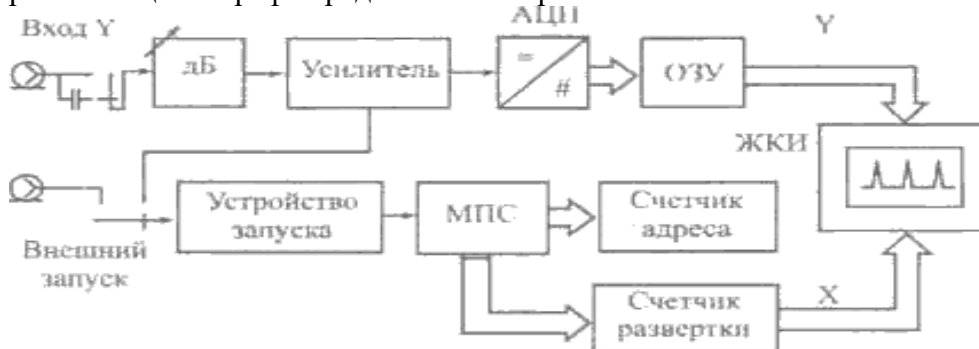


Рис.18. Структурная схема цифрового осциллографа

Входной аналоговый блок выполняет обычные для любого осциллографа функции – регулировку чувствительности, переключение «открытый/закрытый» вход, усиление сигнала. Далее сигнал поступает на быстродействующий аналого-цифровой преобразователь. Моменты выборки значений сигнала определяются тактовой частотой АЦП (дискретизация по времени). Квантование сигнала по уровню задаётся разрядностью АЦП. Как правило, используют равномерную дискретизацию – мгновенные отсчёты сигнала берутся через равные отрезки времени (интервалы дискретизации) и им присваивается цифровой код, соответствующий ближайшему уровню квантования. Разность между соседними уровнями называется интервалом квантования – он определяет разрешающую способность цифрового осциллографа по уровню. Интервал дискретизации определяет быстродействие осциллографа – чем меньше этот интервал, тем более быстрые процессы можно наблюдать на экране без искажения. Массив цифровых данных с АЦП поступает в оперативное запоминающее устройство (ОЗУ).

При формировании изображения данные сигнала последовательно извлекаются из ОЗУ. Для управления выборкой из ОЗУ используют счётчик адресов. Цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) канала Y преобразует поток цифровых данных в аналоговый сигнал, который поступает на вход Y осциллографического индикатора. Одновременно с помощью счётчика развёртки вырабатываются линейно-нарастающие коды, имитирующие ход осциллографической развёртки. Эти коды подают на вход канала X. Аналоговый сигнал развёртки формируют с помощью ЦАП и подают его на вход X индикатора.

Наиболее часто в цифровых осциллографах применяют матричные дисплеи (монохромные и цветные), не требующие обратного цифроаналогового преобразования. Электровакуумные растровые дисплеи в настоящее время заменены матричными индикаторами на жидкокристаллических панелях. Такие дисплеи компактны, не требуют высоковольтных источников питания, обеспечивают равномерную яркость изображения и лёгкость оцифровки осциллограммы. Традиционные ЭЛТ в сочетании с ЦАП в каналах X и Y используют только в комбинированных аналого-цифровых осциллографах.

Момент начала формирования изображения, как и в аналоговом осциллографе, определяется устройством запуска. С этого устройства на микропроцессор поступает импульс, соответствующий началу входного сигнала (или сигналу внешнего запуска). Дополнительно в ЦО предусматривают большое количество программных способов запуска на основе анализа всего преобразованного сигнала.

Для оцифровки мгновенных значений сигнала в ЦО используют быстродействующие АЦП мгновенных значений невысокой разрядности (8, реже – 10 – 12 бит). Частоту дискретизации выбирают в пределах от 10-100 МГц (в недорогих моделях) до единиц и даже десятков ГГц (в быстродействующих ЦО).

Рассмотрим работу параллельного АЦП, который часто применяют в ЦО. Он имеет высокую скорость преобразования – от единиц ГГц (10⁹ отсчётов/сек) для стандартных устройств до 10-20 ГГц для специальных разработок. На рис. 19 показана упрощённая схема трёхразрядного параллельного АЦП.

Он содержит линейку компараторов, делитель напряжения и дешифратор. Каждый компаратор сравнивает входное напряжение U_x с последовательно увеличивающимися порогами квантован

$$-I + \Delta U$$

Эти пороги формируются из опорного напряжения прецизионным резистивным делителем. Значения опорных напряжений начинаются со значения, равного половине младшего значащего разряда, и увеличиваются при переходе к каждому следующему компаратору с шагом, равным $\Delta U = \frac{U}{2^k}$, где k двоичная разрядность АЦП. В результате для приведённого на рисунке 3-хразрядного АЦП требуется $2^3 - 1 = 7$ компараторов. Но для 8-разрядного параллельного АЦП их потребуется уже 255!

Каждый компаратор устанавливает на выходе логическую единицу, если напряжение входного сигнала больше опорного напряжения на втором входе. В противном случае на выходе компаратора сохраняется логический нуль. С увеличением входного напряжения компараторы последовательно, начиная с компаратора младшего разряда, устанавливают на своих выходах логическую единицу. Точка переключения единицы на нуль соответствует мгновенному уровню входного сигнала. Таким образом, логические сигналы на выходе линейки компараторов ведут себя аналогично столбику ртутного термометра при изменении температуры. Поэтому выходной код линейки компараторов называют термометрическим кодом. Для приведения его к более компактному двоичному виду используют преобразователь кодов (дешифратор).

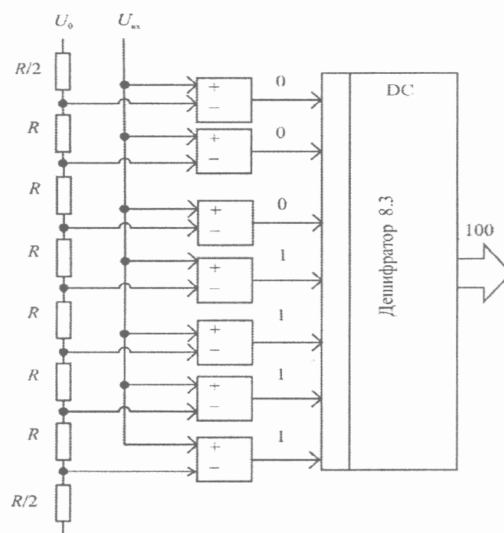


Рис. 19. Трёхразрядный АЦП параллельного типа

Рис. 3-хразрядный АЦП параллельного типа

Быстродействие параллельных АЦП ограничено, в основном, скоростью сравнения напряжений в компараторах. Из-за необходимости использовать большое количество компараторов параллельные АЦП потребляют значительную мощность и довольно громоздки. Комбинация нескольких таких АЦП, работающих с сдвигом по времени («конвейерные АЦП»), позволяет значительно увеличить эффективную частоту дискретизации сигнала. Когда не требуется высокая скорость преобразования, а определяющими факторами являются невысокая цена и низкое энергопотребление, то обычно применяют более компактные АЦП поразрядного уравнивания и последовательного приближения, рассмотренные ранее в главе, посвящённой цифровым вольтметрам. Используют также комбинированные параллельно-последовательные схемы.

Блок памяти ЦО состоит из двух частей: быстрое буферное ОЗУ (БОЗУ) и медленное ОЗУ (МОЗУ). БОЗУ осуществляет приём данных от АЦП в реальном времени с частотой дискретизации входного сигнала. БОЗУ в обычном режиме работы непрерывно пополняется от АЦП. Оно построено по принципу FIFO (первым вошёл – первым вышел), то есть при записи нового отсчёта исчезает самый «старый». Быстродействующее устройство памяти достаточно дорого, поэтому в бюджетных моделях ЦО ёмкость БОЗУ невелика (1...64 Кслов). В дорогих ЦО её делают существенно больше. Например, в современных моделях фирмы *Tektronix TDS -6604* ёмкость БОЗУ составляет 250 Кслов, в *TDS -7704* – 64 Мслова, при этом скорость записи-чтения достаточна для синхронизации его работы с частотой дискретизации АЦП.

Объём БОЗУ («глубина памяти» ЦО) – важнейший параметр осциллографа. Он определяет максимальное количество точек, которыми может быть представлен исследуемый сигнал. Глубина памяти связана с установленным на осциллографе коэффициентом развёртки (временным масштабом изображения) и частотой дискретизации f соотношением 0 (длина шкалы осциллографа обычно 10 делений). Для больших коэффициентов развёртки (например, при наблюдении медленных сигналов) объём памяти может оказаться недостаточным. В этом случае приходится уменьшать частоту дискретизации сигнала. Как правило, для изображения сигнала на обычном матричном индикаторе достаточно 500-1000 точек. Поэтому на экран обычно выводится не все содержимое памяти, а его часть. Часто возникает ситуация, когда на одну точку изображения приходится несколько отсчётов, количество которых задаётся выбранным временным масштабом и частотой дискретизации. Алгоритмы построения изображения в этом случае рассмотрены далее. В ряде осциллографов изображение строят для большего количества точек, чем выводится на экран (скрытый экран). Это позволяет, просматривая изображение, смещать экран влево и вправо, анализируя начальные и конечные фрагменты сигнала.

Второй блок памяти (медленное ОЗУ) представляет собой фактически оперативное запоминающее устройство микропроцессорной системы. МОЗУ имеет большую емкость и используется микропроцессором для хранения результатов вычислений и обработки входных отсчетов, данных изображения (видеопамять) и пр.

Цифровые осциллографы обычно делают многоканальными (как минимум, двухканальными). Преобразованные сигналы распределяются по имеющейся памяти, поэтому обычно глубина памяти на один канал в два раза меньше, чем в одноканальном режиме. Всей работой ЦО управляет встроенный микропроцессор. Различают два класса ЦО: с открытой и закрытой архитектурой. Последние содержат специализированные микропроцессорные системы, достаточно простые и дешёвые, со специальным программным обеспечением работы прибора. Приборы с открытой архитектурой построены на основе персонального компьютера со стандартной операционной системой. Последнее обстоятельство упрощает обработку универсальными программами для персональных компьютеров, позволяет использовать большой объём стандартного программного обеспечения и пр. Подключение цифрового осциллографа к исследуемому устройству осуществляют выносным пробником. Кроме пассивных пробников-делителей, используемых в аналоговых ЭЛО, применяют более сложные активные пробники, позволяющие повысить чувствительность и уменьшить паразитную входную ёмкость. Несмотря на довольно высокую стоимость, активные пробники наилучшим образом подходят для измерений, для которых требуется широкая полоса пропускания (до единиц ГГц). Как правило, такие пробники дороже пассивных и имеют более узкий диапазон входных напряжений. Однако благодаря значительно меньшей входной ёмкости (порядка 1 пФ и менее!) они обеспечивают более точные измерения быстрых сигналов. Для работы активного пробника необходим источник питания, которое подают через «интеллектуальный интерфейс» на входном разъёме ЦО. Он также служит каналом связи между пробником и осциллографом. Как правило, через такой интерфейс ЦО способен определить тип подключенного пробника, установить нужные значения входного импеданса, коэффициента ослабления и диапазона смещения. Отметим, что некоторые осциллографы способны распознавать коэффициенты деления и обычных пассивных пробников, у которых конструкция разъёма предусматривает выдачу информации о коэффициенте деления. В ряде измерительных задач используют специализированные активные пробники. Это, прежде всего, дифференциальные пробники, предназначенные для исследования разницы сигналов между точками схемы, изолированных от общего провода. Такие сигналы можно исследовать двухканальным осциллографом в режиме вычитания каналов, однако этот метод на высоких частотах даёт погрешности из-за неидентичности каналов осциллографа. Дифференциальный пробник преобразует два сигнала в один, который и поступает на вход канала Y для измерения. Применение дифференциального пробника позволяет подавить синфазную помеху, которая наводится на оба входа пробника («синфазный шум»). Использование дифференциальных пробников позволяет упростить подключение ЦО к схемам, выполненным по технологии поверхностного монтажа с планарным расположением элементов (*SMT – Surface Mount Technology*).

Для использования ЦО на сверхвысоких частотах применяют пассивные пробники согласованного типа («согласованная линия передачи»). Он представляет собой линию передачи с волновым сопротивлением 50 Ом, подключенную на 50-омный вход осциллографа. На входе пробника установлен резисторный делитель, обеспечивающий ослабление 10:1 или 20:1 и входное сопротивление 500 или 1000 Ом. Важнейшее преимущество низкоомных пассивных пробников – крайне малая (доли пФ) входная ёмкость и широкая полоса пропускания (порядка нескольких гигагерц), что позволяет выполнять точные измерения временных характеристик. Кроме того, такие пробники имеют относительно невысокую стоимость по сравнению с активными пробниками с такой же полосой пропускания. Следует помнить, что для использования этого типа пробников осциллограф обязательно должен иметь входное сопротивление 50 Ом.

Большинство осциллографических пробников представляют собой датчики напряжения. Однако существуют пробники, которые позволяют регистрировать и другие физические величины. Например, для регистрации тока, протекающего через проводник, используются бесконтактные токовые пробники. Такой пробник преобразует ток в соответствующий сигнал напряжения и подаёт его на вход осциллографа. Головка пробника выполняется в виде многовиткового токового трансформатора, напоминающего токовые клещи цифровых мультиметров. Осциллографические токовые пробники имеют чувствительность порядка десятков мА/дел, максимальное значение измеряемого тока – десятки и даже сотни ампер в полосе частот до сотен МГц.

Особым видом пробников являются «оптические» пробники. Они применяются для гальванической развязки исследуемого устройства от общего провода («земли») осциллографа. Выносной пробник с оптронным изолятором (оптрон – комбинация светодиода и фотодиода) делает гальванически развязанным только сам пробник, а осциллограф остаётся заземлённым. Исследуемый сигнал подаётся на входные контакты изолированного пробника. Схема развязки пробника передаёт сигнал через изолятор на приёмник, который создаёт сигнал относительно «земли», пропорциональный входному дифференциальному сигналу. Другой вид оптических пробников – это преобразователи оптического излучения (например, сигналов волоконно-оптических линий связи) в сигнал напряжения для последующего исследования осциллографом. Представленные на рынке цифровые осциллографы можно условно разбить на несколько видов:

Бюджетные модели ЦО с полосой рабочих частот до 100-500 МГц. Это относительно недорогие, компактные приборы широкого применения. В основном, они предназначены для замены универсальных аналоговых осциллографов. Комбинированные портативные ЦО в сочетании с мультиметром. Их называют скопметры. Эти переносные приборы имеют компактную конструкцию с жидкокристаллическим дисплеем небольшого размера, автономное питание (время работы без подзарядки до нескольких часов). Они предназначены для работы в производственных и полевых условиях. Многофункциональные вычислительные ЦО с мощными встроенными микропроцессорами и компьютерами. Имеют повышенную частоту дискретизации (так, частота 20 ГГц и выше в реальном масштабе времени уже достигнута в современных моделях осциллографов класса фирмы *Tektronix*). Виртуальные ЦО, выполняемые в виде приставок к персональному компьютеру. Приставка содержит аналоговую часть ЦО и АЦП. Для связи с компьютером используют интерфейс USB, поэтому такие приборы носят название «USB-осциллографы». Программное обеспечение виртуального осциллографа позволяет получить на экране ПК переднюю панель виртуального прибора и наблюдать результат его работы.

Режимы работы цифрового осциллографа.

Рассмотрим основные режимы работы блока развёртки ЦО. Он преобразует коды, вырабатываемые микропроцессором, в напряжение развёртки. Для матричных дисплеев коды развёртки преобразуются в номер столбца, соответствующего отображаемой точке. Номер строки дисплея определяется кодом преобразованного значения сигнала. Наиболее простой режим работы блока развёртки имитирует работу самописца (режим самописца – ROLL mode). Он заключается в следующем. Входной сигнал непрерывно записывается в БОЗУ. Одновременно отсчёт сигнала выводится в правом краю экрана. При поступлении следующего отсчёта осциллограмма сдвигается на один столбец влево. Процесс повторяется с каждым новым отсчётом. Таким образом, осциллограмма на экране плавно смещается справа налево, имитируя движение ленты самописца. При достижении левой части экрана самый старый отсчёт теряется. Очевидно, что такое изображение можно наблюдать только при медленных развёртках, в противном случае изображение будет смещаться слишком быстро. В любой момент «самописец» можно остановить и зафиксировать изображение сигнала. Режим самописца в сочетании с запуском ЦО по событию позволяет наблюдать редко происходящие события. Для быстрых сигналов режим самописца применять сложно, так как скорость перемещения изображения становится слишком велика. В

этом случае используют одиночный режим развертки (single shot mode). В нём отсутствует непрерывный вывод отсчётов на экран. Кадр изображения строится последовательно (в реальном времени) по отсчётам входного сигнала при возникновении события запуска (например, ручного нажатия кнопки ПУСК, подачи внешнего сигнала запуска) (рис. 20). Скорость вывода осциллограммы не обязательно совпадает со скоростью оцифровки сигнала. Это позволяет реализовать режим растяжки изображения с сохранением его параметров (точности, яркости и пр.) даже для одиночного режима развёртки. Для наблюдения повторяющихся сигналов используют непрерывный режим развёртки (refresh mode). Этот режим аналогичен автоколебательному или ждущему режимам аналогового осциллографа. В автоколебательном режиме запуска кадры изображения непрерывно строятся даже в отсутствие события запуска. В ждущем режиме кадр строится только при появлении события запуска. Однако в ЦО между событиями запуска на экране сохраняется предыдущий кадр изображения (в аналоговом осциллографе изображение в этом случае отсутствует).

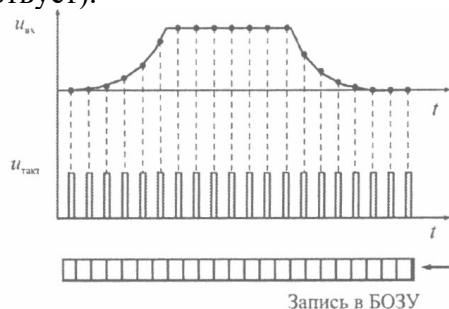


Рис.20. Построение осциллограммы сигнала в режиме реального времени

Рис.20. Построение осциллограммы сигнала в режиме реального времени

Режим эквивалентного времени применяют для наблюдения коротких сигналов (при малых коэффициентах развёртки), когда количество отсчётов от одной копии сигнала на экране в режиме реального времени становится слишком малым. В этом режиме кадр строится на основе данных оцифровки нескольких копий сигнала. На рис. 21 показано изображение, полученное при наложении отсчётов нескольких циклов регистрации сигнала. Этот режим напоминает принцип преобразования временного масштаба, используемый в аналоговых стробоскопических осциллографах, но там от каждой копии сигнала образуется только один отсчёт. В режиме эквивалентного времени можно наблюдать осциллограмму сигнала в масштабе, соответствующем значительно большей частоте дискретизации (до единиц и даже десятков ГГц). Однако это возможно только при исследовании повторяющихся сигналов.

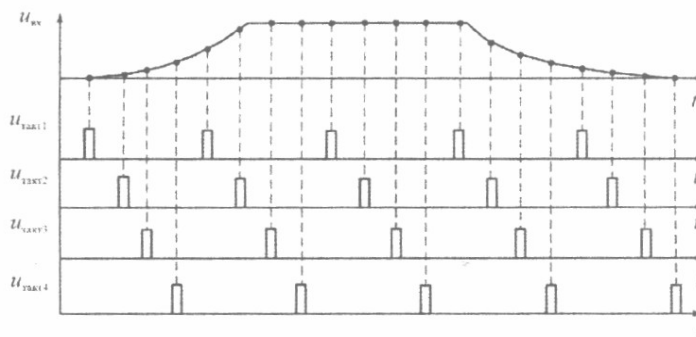


Рис.21. Построение осциллограммы сигнала в режиме эквивалентного времени

Рис.21. Построение осциллограммы сигнала в режиме эквивалентного времени

При построении изображения сигнала используется только часть БОЗУ, поэтому в ЦО возможны режимы «предзапуска» и «послезапуска». Эти режимы специфичны для ЦО и

закljučаются в следующем. Напомним, что аналоговый ЭЛО воспроизводит на экране входной сигнал только после импульса запуска. Информация о других частях сигнала (до запуска и через некоторое время после запуска) отсутствует. В цифровых осциллографах АЦП непрерывно пополняет информацию в БОЗУ. Событие запуска (например, фронт входного сигнала, приход внешнего импульса запуска) делит содержимое БОЗУ на две части – буфер предпусковых данных (предзапись) и буфер послепусковых данных (послезапись). Если при построении изображения осуществить сдвиг адресов БОЗУ (например, считывать данные, предшествующие событию запуска), то на экране воспроизводится форма сигнала, предшествующая запуску. Сдвиг адресов в другую сторону позволяет получить задержанный относительно события запуска сигнал.

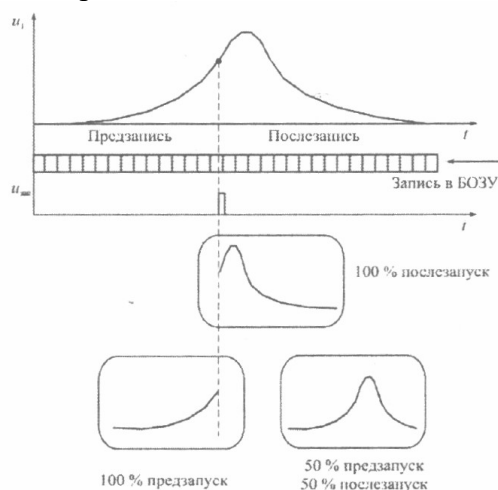


Рис.22. Режимы предзапуска и после запуска цифрового осциллографа

Таким образом, режим предзапуска позволяет «заглянуть в прошлое» на ту часть сигнала, которая предшествовала запускающему импульсу. Режим послезапуска обеспечивает задержку изображения относительно момента запуска. Стандартный режим запуска ЦО: 50% предзапись и 50%послезапись. При этом точка запуска строится в центре экрана индикатора (рис. 22). В этом проявляется отличие запуска ЦО от запуска ЭЛО – у последнего точка запуска располагается всегда в начале экрана. Наличие режимов предзапуска и послезапуска – важное преимущество ЦО, отсутствующее в аналоговых ЭЛО. Рассмотрим условия неискажённого воспроизведения формы сигнала на экране. В ЦО осуществляется дискретизация исследуемого сигнала во времени. Частота дискретизации (по теореме Котельникова) связана с верхней граничной частотой спектра сигнала форму которого можно восстановить без искажения, следующим соотношением . При выводе на экран отсчётов сигнала в виде точек реконструкция его формы происходит визуально, путём мысленного соединения ближайших точек. При малом количестве отсчётов даже при выполнении условия Котельникова возможен эффект «наложения», когда глаз оператора конструирует ложное изображение на рис. 23 демонстрируется эффект наложения при наблюдении гармонического сигнала, на период которого попадает 2 отсчёта.

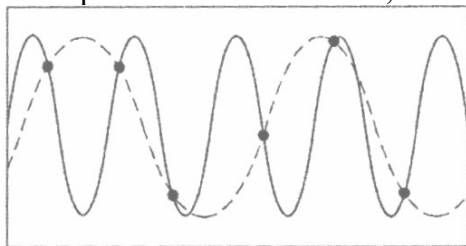


Рис.23. Эффект наложения при недостаточной частоте дискретизации сигнала

Чтобы избежать эффекта наложения, следует придерживаться правила: частота дискретизации должна быть по крайней мере в 10 раз выше частоты сигнала. Это касается любого

цифрового осциллографа в режиме поточечного dots построения изображения. В случае недостаточного количества точек необходимо использовать режим интерполяции (иногда называемый векторным режимом построения изображения). Чаще всего в ЦО применяют два типа интерполяции – линейная и синусоидальная. При линейной интерполяции добавляются точки, расположенные на прямой линии между отсчётами сигнала. При этом для получения качественного изображения достаточно выполнять условие . Линейная интерполяция больше подходит к импульсным сигналам. Для «гладких» сигналов лучше использовать синусоидальную интерполяцию типа , которая позволяет получить приемлемое качество изображения уже при . Для проведения интерполяции необходимо проводить расчёты с большим массивом данных, что снижает скорость вывода осциллограмм на экран.

Рассмотрим теперь режимы построения изображения при достаточно большом количестве отсчётов сигнала. Как уже говорилось ранее, для матричного индикатора достаточно 500-1000 точек, соответствующих разрешающей способности экрана. В то же время часто возникает ситуация, когда количество отсчётов, попадающее на выбранный для наблюдения временной интервал (заданный коэффициентом развёртки и числом делений шкалы), существенно превышает количество точек изображения. То есть, на каждую точку изображения приходится выборка отсчётов, размер которой зависит от временного масштаба и частоты дискретизации. Возникает задача «прореживания» этой выборки (децимация), которая в известном смысле обратна задаче интерполяции. Прореживание данных производится при выводе изображения и выполняется по различным алгоритмам. Так, в стандартном режиме выводится на экран только одна точка из выборки (например, последняя). В режиме усреднения соседних точек на экран выводится точка, представляющая собой среднее арифметическое отсчётов выборки. Этот режим позволяет эффективно снижать шумы квантования АЦП, однако на экране будут представлены не мгновенные значения оцифрованного сигнала, а результаты его обработки (усреднения). В ряде измерительных задач это нежелательно. В режиме пик-детектора каждая нечётная точка строится по отсчёту с максимальным значением в выборке; следующая (чётная) – по отсчёту с минимальным значением в выборке. Режим пикдетектора не позволяет пропустить короткие выбросы в сигнале. Наличие в сигнале коротких импульсных помех остаётся скрытым в стандартном режиме, но они хорошо наблюдаются в режиме пик-детектора. Применение этого режима позволяет использовать максимальную частоту дискретизации прибора на длинных развёртках. Цифровые осциллографы имеют широкий выбор режимов синхронизации и запуска. Событие запуска в ЦО имеет смысл начала построения осциллограммы – по фронту, срезу, по определённой длительности сигнала, по заданному численно уровню сигнала. Синхронизация по длительности импульса (или по выбросу) – это запуск развёртки по длительности импульса, меньшей или большей выбранного значения, равной или не равной выбранному.

ЦО, как правило, имеют режим синхронизации и запуска телевизионным сигналом по выбранным строкам, по нечётным и чётным полям, по всем полям композитного видеосигнала или телевещательных стандартов (NTSC, PAL, SECAM). Для исследования цифровых сигналов применяют запуск по кодовому слову, по заданному количеству импульсов, по сигналам шин интерфейсов (например, USB, CAN, и др.). Это могут быть стартовые биты кадра данных, состояния начала и конца пакета данных и др.

В цифровых осциллографах режим записи/воспроизведения сигнала реализуется при однократном запуске АЦП. Буфер данных полностью заполняется и после этого сбор данных прекращается (отключается АЦП). Весь буфер БОЗУ при этом доступен для просмотра в произвольном масштабе (с растяжкой, сжатием, со смещением по времени и пр.).

Теоретическая часть Осциллограф ADS-2111M – цифровой осциллограф, предназначенный для исследования электрических сигналов путём их визуального наблюдения на жидкокристаллическом индикаторе и измерения их амплитудных и временных параметров.

Прибор измеряет заданные параметры в реальном времени и выводит информацию на специальный экран (внешний монитор или телевизор).

Подробные основные и дополнительные технические характеристики прибора, принцип его работы и порядок выполнения измерений описаны в руководстве «Осциллограф ADS-2111M. Руководство по эксплуатации». На рис.5.1 и 5.2 показаны органы управления осциллографа ADS-2111M.

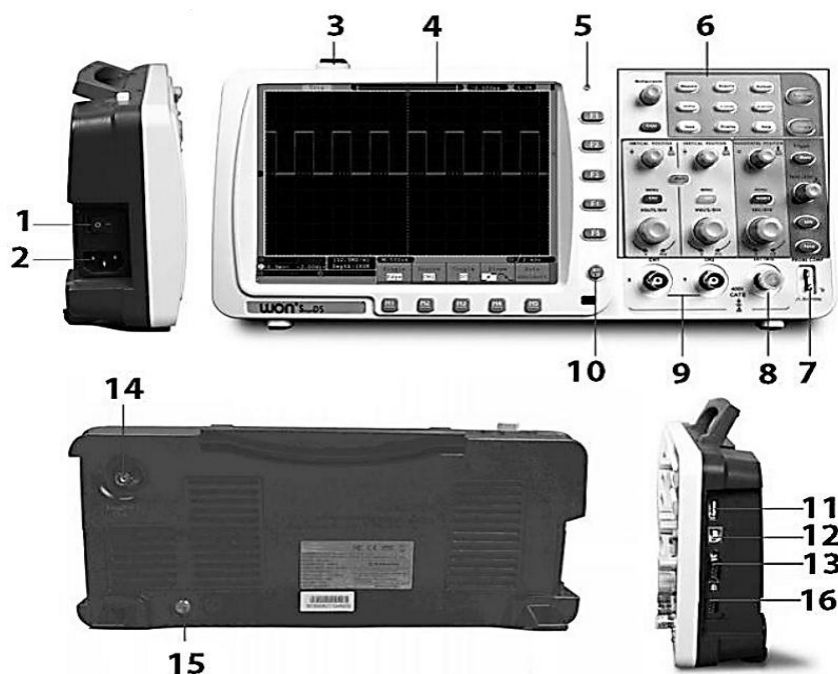


Рис. 5.1. Передняя и задняя панели прибора. Виды сбоку 86

1. Кнопка включения питания.
2. Разъём для подключения кабеля питания.
3. Кнопка включения прибора.
4. Дисплей прибора.
5. Индикатор сети: зелёный – прибор включён в сеть, батарея полностью заряжена (при использовании батареи); жёлтый – прибор включён в сеть, батарея заряжается (при использовании батареи).
6. Область органов управления (рассмотрены на рис.2).
7. Разъём для компенсации пробника.
8. Разъём для внешнего запуска прибора.
9. Входные разъёмы каналов CH1 и CH2.
10. Кнопка включения/выключения меню.
11. USB-интерфейс для подключения внешнего запоминающего устройства.
12. USB-интерфейс для подключения к компьютеру.
13. Разъём RS-232.
14. Разъём выхода Pass/Fail.
15. Винт для подключения к «земле».
16. LAN-интерфейс.

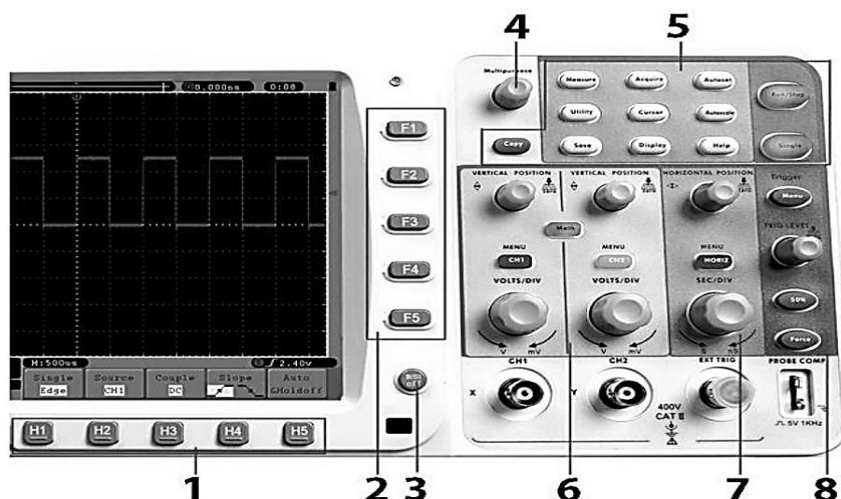


Рис. 5.2. Описание органов управления на передней панели

1. Функциональные кнопки управления меню H1-H5.
2. Функциональные кнопки управления меню F1-F5.
3. Кнопка включения/выключения меню.
4. Поворотный регулятор.
5. Кнопки меню функций.
6. Органы управления вертикальной системой.
7. Органы управления горизонтальной системой.

Подготовка прибора к работе

Подключить шнур питания прибора к сети 220 В и включить прибор. В течение нескольких секунд прибор произведёт самостоятельное тестирование, после чего на экране появится рабочее окно осциллографа. При работе с прибором необходимо ознакомиться с кнопками непосредственного управления. К кнопкам непосредственного управления относятся: *AUTOSET*; *RUN.STOP*; *SINGLE*; *COPY*.

Кнопка *AUTOSET*. Эта кнопка используется для автоматического выбора настроек осциллографа, наиболее подходящих для получения осциллограммы сигнала. Нажать на кнопку *AUTOSET*, и осциллограф автоматически покажет осциллограмму сигнала.

Кнопка *RUN.STOP*. Данная кнопка осуществляет остановку и запуск регистрации.

Замечание! В состоянии «*STOP*» вертикальный и горизонтальный масштабы осциллограммы могут быть изменены в некоторых пределах. Другими словами, сигнал можно растянуть в горизонтальном или вертикальном направлении. При коэффициенте развёртки, меньшем или равном 50 мс горизонтальный масштаб может быть изменён на 4 шага вниз.

Кнопка *SINGLE*. Нажать на кнопку *SINGLE* для однократного запуска прибора для регистрации сигнала.

Кнопка *COPY*. Кнопка быстрого сохранения сигнала в соответствии с заданными параметрами в меню *SAVE*.

Автоматическая калибровка

Перед началом работы с прибором необходимо произвести компенсацию пробника и автоматическую калибровку (см. «Руководство по эксплуатации»). Использование автоматической калибровки обеспечивает максимальную точность измерений. Можно запустить калибровку в любое время, но при изменении температуры на 5 или более градусов автоматическая калибровка должна быть выполнена обязательно.

Перед запуском автокалибровки от входных разъёмов осциллографа необходимо отключить пробники или соединительные кабели.

- Нажать кнопку «*UTILITY*».

- Нажать кнопку *H1* для вызова меню «*FUNCTION*».
- Поворотным регулятором выбрать элемент меню «*ADJUST*».
- Нажать кнопку *H2* для запуска автоматической калибровки (элемент *SELF CAL*).
- Нажать кнопку *H2* для запуска процедуры автокалибровки или любую другую кнопку, если процедуру автокалибровки выполнять не надо.

Быстрое преобразование Фурье Быстрое преобразование Фурье (*FFT*, или *БПФ*) позволяет математически получить из временной зависимости сигнала его частотные компоненты, т.е. проводить анализ сигналов не только во временной, но и в частотной области. Осциллограф позволяет преобразовать 2048 точек (выборок) сигнала во временной области в 1024 точки частотной области в диапазоне от 0 Гц до частоты Найквиста. Предельная частота (частота Найквиста) равна половине частоты выборки аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Выполнение операции БПФ проводится следующим образом:

1. Нажать кнопку «*MATH*» для входа в меню математических операций.
 2. Нажать функциональную кнопку *H2* для входа в меню выполнения БПФ.
 3. Функциональной кнопкой *F1* выбрать источники сигнала для БПФ.
 4. Нажатием функциональной кнопки *F2* выбрать тип окна для выполнения БПФ: *Rectangle*, *Hamming* или *Blackman* (см. «Руководство по эксплуатации»).
 5. Нажатием функциональной кнопки *F3* выбрать размерность шкалы по вертикали *dB* или *Vrms*.
 6. Нажатием функциональной кнопки *F4* выбрать кратность увеличения фрагмента: .
 7. Регулятором «*HORIZONTAL POSITION*» передвинуть результат БПФ в контрольную зону.
 8. Регулятором «*VERTICAL POSITION*» можно изменить вертикальное положение результата БПФ.
 9. При необходимости можно воспользоваться курсорными измерениями.
- Для выбора оптимальных условий преобразования предлагается четыре функции окна для: *Rectangle*, *Hamming* или *Blackman*. Каждая функция окна предполагает компромисс между разрешающей способностью по частоте и точностью определения амплитуды. Приоритетами измерения и характеристиками источника сигнала определяется тип используемого окна. Примеры спектров при использовании различных окон приведены в «Руководстве по эксплуатации».

Следует учитывать также, что:

1. сигналы, имеющие в спектре постоянную составляющую, могут стать причиной неверного результата измерений *FFT* (*БПФ*). Для уменьшения влияния постоянной составляющей, необходимо включить **связь входа по переменному току (AC)**;
2. для уменьшения влияния белого шума и помех дискретизации при обработке периодических сигналов, необходимо использовать режим регистрации осциллографа – «Усреднение»;
3. для отображения на экране результатов *FFT* (*БПФ*) с большим динамическим диапазоном необходимо использовать логарифмическую шкалу «*dB*»;

Ход работы:

1. Ознакомиться с теоретической частью.
2. Выполнить экспериментальную часть
3. Ответить на вопросы.

Экспериментальная часть

Установка типа связи по входу *CH1*

1. Нажать кнопку *CHIMENU* для входа в меню установок канала *CH1*.

2. Нажать функциональную кнопку *H1* для входа в меню установки типа связи по входу.
 3. Функциональной кнопкой *F1* выбрать либо открытый вход (*DC*), либо кнопкой *F2* – закрытый вход (*AC*), либо кнопкой *F3* – замыкание входа на землю.
 4. Выбранный тип связи по входу отобразится в элементе меню «*Coupling*»
- На рис. 5.2 показан выбор закрытого типа связи по входу (*a*) и открытого типа (*б*).

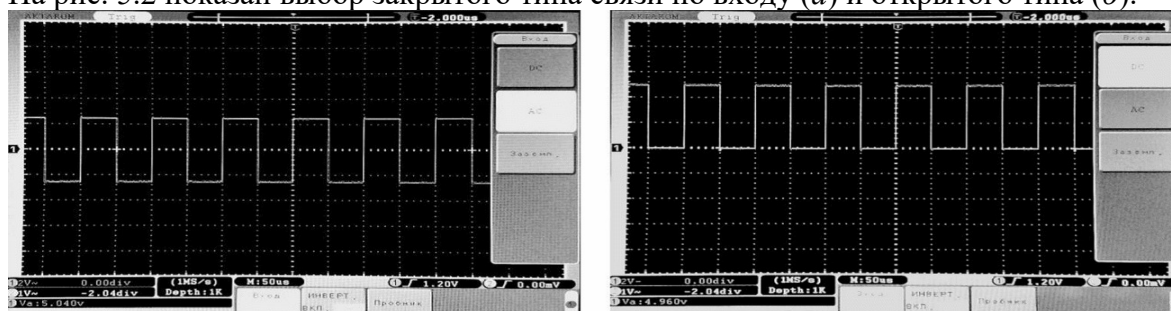


Рис. 5.2. Осциллограмма прямоугольных импульсов положительной полярности при закрытом (*a*) и открытом входе *CH1* (*б*)

Установка коэффициента ослабления пробника для канала *CH1*

Для отображения осциллограммы сигнала в правильном масштабе необходимо сделать установку коэффициента ослабления пробника в меню настроек канала, соответствующую действительному ослаблению пробника. Для этого:

1. Нажать кнопку «*CHIMENU*» для входа в меню установок канала *CH1*.
2. Нажать функциональную кнопку *H3* для входа в меню установки коэффициента ослабления.
3. Функциональной кнопкой *F2* выбрать коэффициент ослабления пробника 1:1.
4. Выбранный коэффициент ослабления отобразится в элементе меню «*Probe*».

Таблица 5.1. Коэффициент ослабления пробника и соответствующие установки меню.

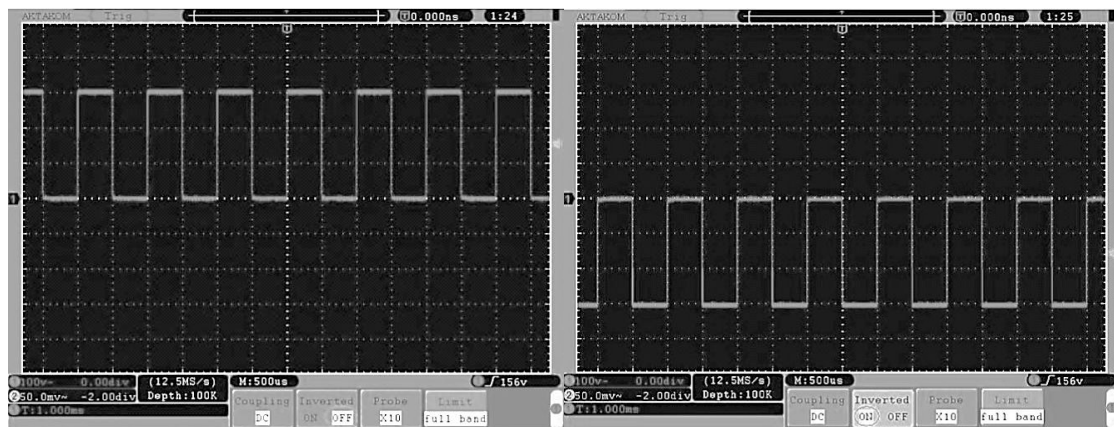
Коэффициент ослабления пробника	Соответствующая установка меню
1:1	1
10:1	10
100:1	100
1000:1	1000

Замечание! При использовании пробника с ослаблением 1:1 необходимо выбрать установку 1. Это поможет избежать ошибок масштаба при отображении осциллограммы или значения измеряемых величин.

Инверсия осциллограммы на канале

Инверсия осциллограммы – это изменение фазы сигнала на 180.

1. Нажать кнопку «*CHIMENU*» для входа в меню установок канала *CH1*.
2. Нажать функциональную кнопку для входа в меню установки инверсии. Затем для включения инверсии в элементе меню «*Inverted*» установить «*ON*». Для выключения инверсии элемент меню «*Inverted*» установить в состояние «*OFF*». На рис. 5.3 представлен вид экрана с формой сигнала.



а)

б)

Рис.5.3. Форма сигнала без инверсии (а) и с инверсией (б)

Курсорное измерения амплитудных параметров сигнала канала CH1

1. Нажать кнопку для входа в режим курсорных измерений.
2. Нажать кнопку H2 для выбора источника сигнала. Сделать активным канал CH1.
3. Нажать кнопку H1 для выбора типа курсора.
4. Нажатием кнопки F2 выбрать режим курсоров по напряжению (Vjltage). На экране появятся две горизонтальные линии пурпурного цвета, которые соответствуют курсорам 1 и 2.
5. Регулятором «VERTICALPOSITION» канала CH1 можно изменить положение курсора 1, а при помощи регулятора «VERTICALPOSITION» канала CH2– положение курсора 2.
6. Результат курсорных измерений отображается в отдельном окне в нижнем левом углу экрана (рис. 5.4).

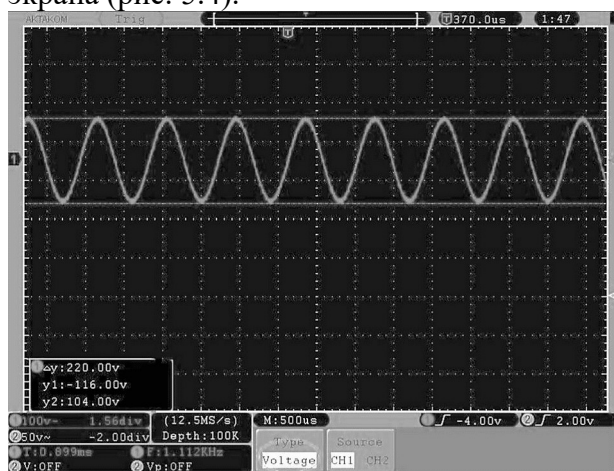


Рис.5.4. Курсорные измерения в амплитудной области

Курсорные измерения временных параметров сигнала канала CH1

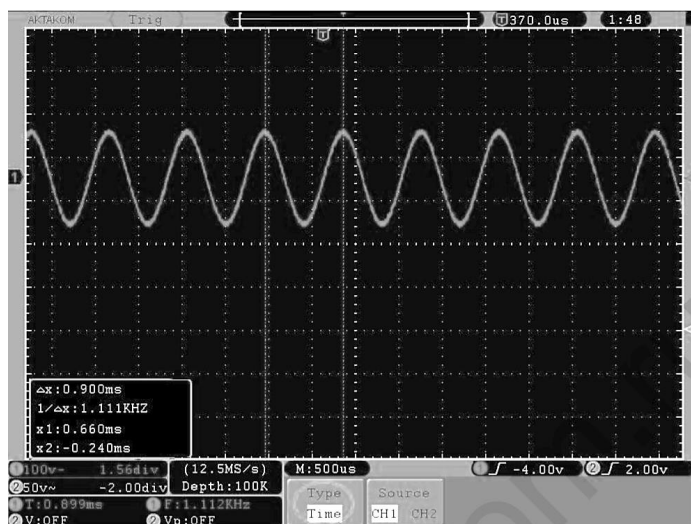


Рис. 5.5. Курсорные измерения во временной области.

1. Нажать кнопку «*CURSOR*» для входа в режим курсорных измерений.
2. Нажать кнопку *H2* для выбора источника сигнала. Сделать активным канал *CH1*.
3. Нажать кнопку *H1* для выбора типа курсора.
4. Нажатием кнопки *F3* выбрать режим курсоров в частотно-временной области (*Time*). На экране появятся две вертикальные линии пурпурного цвета, которые соответствуют курсорам 1 и 2.
5. Регулятором «*VERTICALPOSITION*» канала *CH1* можно изменить положение курсора 1, а при помощи регулятора «*VERTICALPOSITION*» канала *CH2* – положение курсора 2.
6. Результат курсорных измерений отображается в отдельном окне в нижнем левом углу экрана (рис. 5.5).

Курсорные измерения в режиме быстрого преобразования Фурье (БПФ)

Данные измерения доступны только при включённом режиме БПФ.

1. Нажать кнопку «*MATH*» для входа в режим математических операций.
2. Нажать кнопку *H2* для выбора активным режим БПФ (*FFT*).
3. Нажать кнопку «*CURSOR*» для входа в режим курсорных измерений в режиме БПФ.
4. Нажать кнопку *H1* для выбора типа курсора.
5. Нажатием кнопки *F2* выбрать режим курсоров в амплитудной области (*Vamp*), а нажатием кнопки *F3* – выбрать режим курсоров в частотной области (*Freg*). На экране появятся две линии пурпурного цвета, которые соответствуют курсорам 1 и 2. Регулятором «*VERTICALPOSITION*» канала *CH1* можно изменить положение курсора 1, а при помощи регулятора «*VERTICALPOSITION*» канала *CH2* – положение курсора 2.

Таблица 5.2. Меню курсорных измерений в режиме БПФ

МЕНЮ	УСТАНОВКИ	ОПИСАНИЕ
<i>Type</i>	<i>OFF</i>	Выключение курсорных измерений в режиме БПФ.
	<i>V amp</i>	Отобразить курсоры для измерения в амплитудной области в режиме БПФ.
	<i>Fred</i>	Отобразить курсоры для измерения в частотной области в режиме БПФ.
<i>Source</i>	<i>Math FFT</i>	Источник сигнала – БПФ

6. Результат курсорных измерений в режиме БПФ отображается в отдельном окне в нижнем левом углу экрана (рис. 5.6)

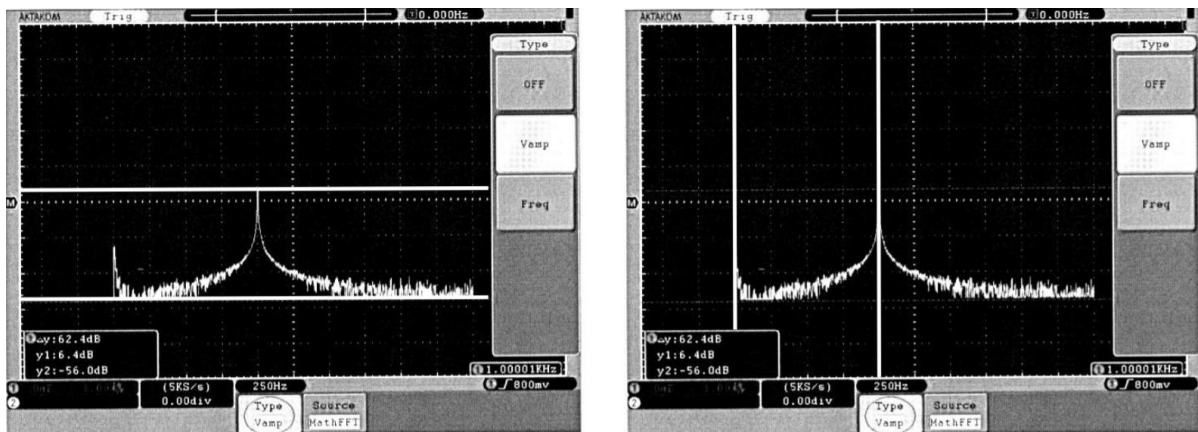


Рис. 5.6. Измерение амплитуды (а) и частоты (б) в режиме БПФ при помощи курсоров

Контрольные вопросы

1. Для чего предназначена система вертикальной развёртки в цифровом запоминающем осциллографе?
2. Какую функцию выполняет масштабирующее устройство?
3. В каком соотношении должны находиться частота исследуемого сигнала и полоса пропускания осциллографа для получения погрешности измерения амплитуды менее 2%?
4. Как должны соотноситься время нарастания переходной характеристики осциллографа и длительность фронта исследуемого сигнала для достижения погрешности измерения менее 2%?
5. Какие АЧХ и переходные характеристики (ПХ) осциллографа являются оптимальными?
6. Для чего предназначен АЦП?
7. Как происходит преобразование аналогового сигнала в цифровой?
8. Что такое дискретизация?
9. В каком соотношении должны находиться частота дискретизации и спектр исследуемого сигнала для его однозначного восстановления?
10. Что такое квантование и какова минимальная разрядность АЦП типового бюджетного осциллографа?

Практическая работа № 13.

Тема 3.1. Элементная база электронных устройств.

Полупроводники.

Цель работы: расширить и систематизировать знания о физических процессах, протекающих в полупроводниках.

Теоретическая часть:

При изготовлении электронных приборов и устройств используют самые разнообразные материалы, выполняющие функции проводников, диэлектриков, полупроводников. Металлы широко применяются в качестве соединительных проводников и элементов катушек индуктивности; органические и неорганические диэлектрики — в качестве изоляторов и составных частей конденсаторов, полупроводники — для изготовления диодов и транзисторов.

Многие электронные приборы и устройства основаны на использовании физических особенностей границ раздела материалов с разными свойствами (проводники и полупроводники, проводники и диэлектрики).

Известно, что все вещества состоят из одного или более химических элементов. Мельчайшими составными частицами вещества являются атом и молекула. Как правило, атомы

различных химически чистых элементов соединяются с образованием молекул вещества. Например, молекулы водорода, кислорода, азота и инертных газов состоят из двух атомов. Молекулы, из которых состоит вещество, определяют свойства данного вещества. Например, молекула воды состоит из двух атомов водорода и одного атома кислорода, что и определяет ее физические свойства (плотность, температуры кипения и замерзания). Молекулы органических веществ состоят из многих атомов, соединенных определенным образом. Различие структур соединений одних и тех же атомов определяет получение веществ с различными физическими свойствами. Атом состоит из электронов, вращающихся вокруг ядра, находящегося в центре атома и содержащего протоны и нейтроны. Отрицательно заряженные электроны притягиваются к ядру с положительно заряженными протонами и непрерывно вращаются по орбитам, или оболочкам, вокруг него. Атомы разных элементов отличаются друг от друга числом протонов и электронов, например, у атома водорода один протон и один электрон, а атом углерода имеет четыре протона и четыре электрона. Число электронов в атоме равно числу протонов, однако они не могут находиться на одном расстоянии от ядра, так как отталкиваются друг от друга. Электроны также не могут находиться на произвольных расстояниях от ядра и занимают только разрешенные энергетические уровни. На первом уровне могут находиться максимум два электрона, а на втором и далее — до восьми. Число протонов определяет атомный номер элемента в Периодической системе элементов Д.И. Менделеева, общее число протонов и нейтронов — его атомную массу, а число электронов, занимающих последний энергетический уровень, во многом определяет физические и химические свойства вещества. Если последний разрешенный энергетический уровень атома полностью заполнен, то этот атом инертен (инертными газами являются гелий, неон, аргон, криптон, ксенон). Если на последнем энергетическом уровне атома находятся от одного до трех электронов, то они слабо связаны с ядром и атом склонен отдавать эти электроны при соединении с другими элементами. При этом говорят, что он обладает металлическими свойствами. Если до полного заполнения последнего энергетического уровня атома не хватает одного, двух или трех электронов (т.е. имеется от одной до трех вакансий), то атом склонен притягивать электроны при соединении с другими элементами. При этом говорят, что он обладает неметаллическими свойствами. В металлических веществах электроны, слабо связанные с ядром (так называемые свободные электроны), под действием электрического потенциала покидают свои орбиты и начинают упорядоченное движение, образуя поток электронов, или электрический ток. Такие вещества, имеющие хорошую электрическую проводимость, называются проводниками. Хороший проводник имеет большое число несвязанных (или слабо связанных) с ядром электронов, которые способствуют возникновению электрического тока. Проводник обладает на небольших отрезках (до 1 м) столь малым сопротивлением, что им можно пренебречь. Примерами хороших проводников являются серебро, медь, алюминий. Наличие свободных электронов и, соответственно, свойства металлических соединений определяют высокую теплопроводность проводников. Диэлектрик (изолятор) — это материал, имеющий только связанные электроны, т.е. не имеющий свободных электронов. Изоляторы препятствуют протеканию электрического тока и, следовательно, обладают очень большим сопротивлением (приближающимся к сопротивлению разомкнутой цепи). Примерами изоляторов могут служить диоксид кремния (кварц), стекло, сухое дерево, резина, поливинилхлорид, слюда, полистирол и др. Если диэлектрик поместить в электрическое поле, то электроны его молекул ориентируются в определенном порядке за счет поляризации. При этом говорят, что молекулы ди-

электрика поляризуются. Атомы полупроводников относятся к четвертой группе Периодической системы элементов Д. И. Менделеева. К ним относятся углерод (C), кремний (Si) и германий (Ge). Как правило, чистые полупроводники являются аморфными веществами. Однако при определенных условиях при получении из расплавов они могут образовывать монокристаллы с правильной кристаллической решеткой. К полупроводникам относятся и некоторые соединения металла и неметалла, например, арсенид галлия (GaAs) и уникальные соединения — карбид кремния (SiC) и нитрид кремния (SiN). Полупроводники имеют слабую собственную проводимость, обусловленную наличием небольшого количества свободных электронов. Причем появление свободного электрона под действием температуры или света создает появление положительно заряженного атома с недостающим электроном, который называется дыркой. При этом дырка может захватывать электрон соседнего атома, который в этом случае станет дыркой. Таким образом, дырки могут перемещаться до тех пор, пока не найдут свободный электрон и соединятся с ним. Свободные электроны и дырки полупроводника — основные носители зарядов, они создают слабую собственную проводимость. Процесс образования электронов и дырок под действием теплоты или света представляет собой генерацию носителей зарядов. Количество свободных электронов и дырок в полупроводниках возрастает при повышении температуры, что приводит к увеличению их проводимости, в отличие от металлов, проводимость которых с ростом температуры падает. Проводимость полупроводника можно повысить посредством введения определенного количества легирующих присадок (примесей). Некоторые присадки (например, атомы мышьяка As, неметалла пятой группы) вносят в кристаллическую решетку атома германия дополнительные электроны, в результате чего получают полупроводник *n*- типа (*negative*). Такие атомы называются атомами-донорами. Добавление к кристаллическому германию атомов-акцепторов (например, атомов алюминия Al, металла третьей группы) создает недостаток электронов в его внешней оболочке, т.е. образование дырок, имеющих положительный заряд. Такие полупроводники называются полупроводниками *p*- типа (*positive*). Полученные при внедрении примесей электроны являются основными носителями для полупроводников *n*- типа, а дырки — для полупроводников *p*- типа. Явления проводимости в металлах, диэлектриках и полупроводниках хорошо описываются на основе зонной теории, которая вводит понятие энергетического состояния электрона, обладающего кинетической и потенциальной энергией. Согласно зонной теории энергия электрона в твердом теле может изменяться в некоторых пределах практически непрерывно, но при этом существуют интервалы значений энергии (запрещенные уровни), которые электрон может преодолевать только скачком. Электроны в твердом веществе могут находиться только в валентной зоне (ВЗ) или в зоне проводимости (ЗП), между которыми имеется запрещенная зона (ЗЗ). Для перевода электрона из валентной зоны в зону проводимости требуется придать ему дополнительную энергию ΔE , называемую энергией активации и измеряемую в электрон-вольтах (эВ). У атомов полупроводникового кремния энергия активации $\Delta E_{\text{Si}} = 1,12$ эВ выше, чем у атомов германия $\Delta E_{\text{Ge}} = 0,72$ эВ, поэтому перевести кремний в проводящее состояние труднее. Введением легирующих примесей можно уменьшить зону проводимости или увеличить валентную зону и таким образом уменьшить ширину запрещенной зоны. Расположение электронов и ширина запрещенной зоны полностью определяют электрические свойства вещества. Дело в том, что валентные электроны сильно связаны с атомами и не могут переходить от атома к атому под действием электрического поля. И наоборот, электроны, находящиеся в зоне проводимости, менее связаны с атомами и легко перемещаются от одного атома к

другому под воздействием электрического поля. Зонная теория объясняет это наличием многих свободных уровней в зоне проводимости. У диэлектриков валентная зона полностью заполнена электронами и отделена от зоны проводимости широким барьером запрещенной зоны. Вследствие этого у диэлектриков нет свободных электронов в зоне проводимости и, соответственно, они имеют плохую проводимость.

Свойства полупроводников.

1. Электрофизические свойства полупроводников (п /п).
2. Основные свойства и характеристики п /п.
3. Электрические переходы.
- 4 Особенности реальных *p-n*- переходов.

Все вещества состоят из атомов, в состав которых входят положительно заряженные ядра и вращающиеся вокруг них отрицательно заряженные электроны. В ядро входят электрически нейтральные нейтроны и положительно заряженные протоны. Количество протонов в ядре определяет его заряд. Отрицательный заряд электрона по величине равен положительному заряду протона. В нормальном состоянии число электронов, образующих электронную оболочку атома, равно числу протонов в ядре, и атом электрически нейтрален. Электроны вращаются вокруг ядра по орбитам, сгруппированным в слои. Каждому слою соответствует строго определённая энергия электрона W (так называемый разрешённый энергетический уровень). Количество электронов в слоях строго определено: в первом, ближайшем к ядру слое может находиться не более двух электронов, во втором – не более восьми и т. д. Электроны целиком заполненных слоёв устойчивы к внешним воздействиям. «Не уместившиеся» во внутренних слоях электроны образуют незаполненный внешний слой, который легко отдаёт и принимает электроны. Эти электроны определяют валентность элемента при химических реакциях. Чем дальше от ядра расположена орбита электрона, тем большей энергией он обладает. Под воздействием энергии теплоты, света, радиации или каких-либо других внешних факторов электрон из валентной зоны может перейти на новую, более удалённую от ядра орбиту. Такой электрон называется возбуждённым, а при дальнейшем увеличении энергии, называемой работой выхода, электрон покидает поверхность вещества.

В кристалле происходит взаимодействие между соседними атомами, заключающееся в том, что на электроны атома воздействуют ядра соседних атомов. В результате разрешённые энергетические уровни электронов смещаются и расщепляются на несколько – по числу соседних атомов в кристаллической решётке. Эти уровни создают энергетические зоны. Совокупность энергетических уровней, соответствующих внешнему слою электронов, образует *валентную зону*. Разрешённые уровни энергии, которые остаются незанятыми, *составляют зону проводимости*, так как её уровни могут занимать возбуждённые электроны, обеспечивающие электропроводность вещества. Между валентной зоной и зоной проводимости может располагаться запрещённая зона.

Зонная структура лежит в основе разделения веществ на проводники, полупроводники и диэлектрики. На рис.1 показано расположение энергетических зон для этих групп веществ.

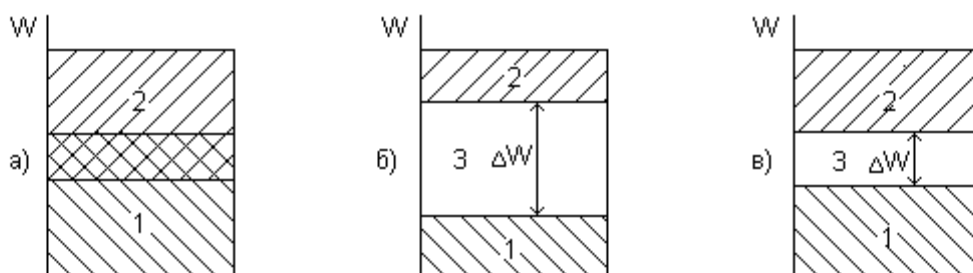


Рисунок 1 – Энергетические зоны проводника (а), диэлектрика (б) и полупроводника.
 1 – валентная зона; 2 – зона проводимости; 3 – запрещенная зона

У проводников (металлов) валентная зона 1 и зона проводимости 2 перекрывают друг друга (рис.1, а) и валентные электроны легко переходят в зону проводимости. У диэлектриков (рис.1, б) ширина запрещённой зоны велика (более 6 электрон-Вольт(эВ)), и для перехода валентных электронов в зону проводимости им необходимо сообщить значительную энергию. У полупроводников (рис.1, в) запрещённая зона сравнительно мала и колеблется от 0,1 до 3,0 эВ.

В кристаллической решётке четырёхвалентного полупроводника (например, кремния, германия) каждый атом связан с четырьмя соседними атомами с помощью двух валентных электронов – по одному от каждого атома. Такая связь называется *ковалентной*. При её образовании электрон принадлежит уже не одному, а обоим связанным между собой атомам, т. е. является для них общим. В результате вокруг каждого ядра образуется восьми электронная оболочка, устойчивая к внешним воздействиям. Так как все валентные электроны оказываются прочно связанными между собой, свободных электронов, способных обеспечить электронную проводимость, нет. Такую структуру имеют химически чистые полупроводники при температуре – 273⁰С (абсолютный ноль), рис.2,а.

Под воздействием внешних факторов (например, при повышении температуры) отдельные электроны атомов кристаллической решётки приобретают энергию, достаточную для освобождения от ковалентных связей, и становятся свободными.

При освобождении электрона от ковалентной связи в кристаллической решётке возникает свободное место, обладающее положительным зарядом. Такое место называется *дыркой*, а процесс образования пары «свободный электрон – дырка» — генерацией.

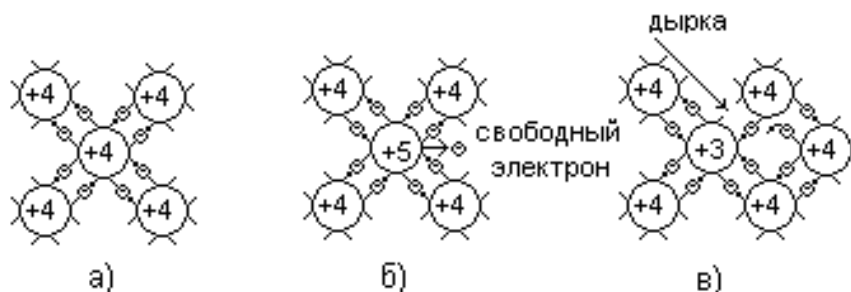


Рисунок 2 – Кристаллическая структура

чистого проводника (а); полупроводника с донорной (б) и акцепторной (в) примесью

В дырку может «перескочить» валентный электрон из ковалентной связи соседнего атома. В результате ковалентная связь в одном атоме восстановится (этот процесс называется *рекомбинацией*), а в соседнем – разрушится, образуя новую дырку. Такое перемещение дырки по кристаллу равносильно перемещению положительного заряда.

При отсутствии внешнего электрического поля дырки в кристалле перемещаются хаотически. Если же к кристаллу приложить разность потенциалов, то под воздействием созданного электрического поля движение дырок и электронов становится упорядоченным, и в кристалле возникает электрический ток. Таким образом, проводимость полупроводника обусловлена перемещением как отрицательно заряженных электронов, так и положительно заряженных дырок. Соответственно различают два типа проводимости – *электронную*, или *проводимость n – типа*, и *дырочную*, или *проводимость p – типа*.

Для создания полупроводниковых элементов широко применяют *примесные полупроводники*. С четырёхвалентным германием и кремнием используют пятивалентные (мышьяк, сурьму, фосфор) и трёхвалентные примеси (бор, алюминий, индий, галлий).

В случае пятивалентной примеси (рис.2, б) четыре валентных электрона примесного атома совместно с четырьмя электронами соседних атомов основного вещества образуют ковалентные связи, а пятый валентный электрон оказывается «лишним». В результате даже при комнатной температуре «лишние» электроны легко освобождаются от своих атомов, переходя в зону проводимости. В таких полупроводниках электропроводность обеспечивается главным образом избытком свободных электронов. Их называют полупроводниками *n – типа*, а примеси – *донорными*.

За счёт тепловой энергии в полупроводнике *n -типа* могут образоваться и отдельные дырки при генерации пар «свободный электрон – дырка». Поэтому в полупроводниках *n -типа* называют основными, а дырки – неосновными носителями зарядов.

При введении трёхвалентной примеси (рис.2, в) в одной из ковалентных связей примесного и атома основного полупроводника отсутствует электрон, т. е. образуется дырка. Разрешённые энергетические уровни валентных зон примеси и основного полупроводника находятся рядом. Электрон валентной зоны атома основного полупроводника легко захватывается трёхвалентным атомом примеси, в результате чего дырка образуется уже в атоме основного полупроводника и, таким образом перемещается по кристаллической решётке. Дырки в таких полупроводниках становятся основными носителями зарядов, создавая эффект перемещения положительных зарядов. Трёхвалентные примеси называют *акцепторными*, а полупроводники с такой примесью – полупроводниками *p -типа*. Неосновными носителями в этом случае выступает небольшое количество свободных электронов, образовавшихся в результате тепловой генерации пар «свободный электрон – дырка».

Реальный p - n -переход и его свойства

Тонкий слой полупроводника между двумя областями, одна из которых представляет *p -тип*, а другая *n -тип* называют *p - n -переходом*, (рис.3, а). Концентрации основных носителей заряда в *p -* и *n -*областях могут быть равными или существенно отличаться. В первом случае *p - n -переход* называют симметричным, а во втором – несимметричным. Чаще используют несимметричные переходы.

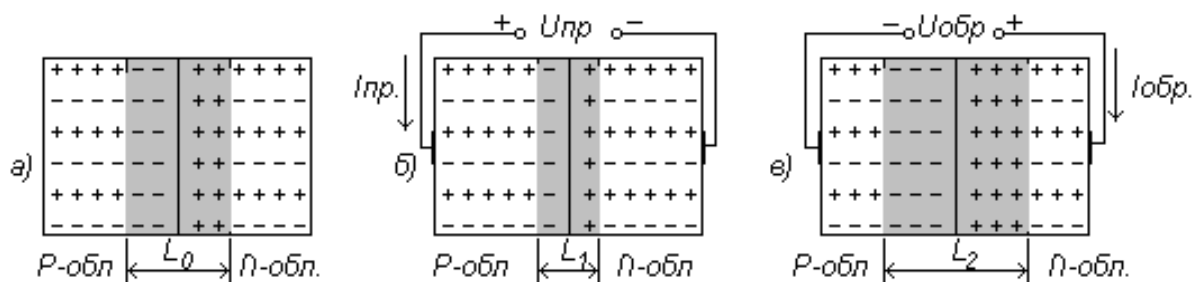


Рисунок 3 – Структура p-n перехода

а) в равновесном состоянии; б) при прямом внешнем напряжении; в) при обратном внешнем напряжении

Пусть концентрация акцепторной примеси в *p*-области больше, чем концентрация донорной примеси в *n*-области.

За счёт диффузии дырки из *p*-области и электроны из *n*-области стремятся равномерно распределиться по всему объёму. Если бы электроны и дырки были нейтральными, то диффузия в конечном итоге привела бы к полному выравниванию их концентраций по всему объёму кристалла. Однако этого не происходит. Дырки, подошедшие к границе со стороны *p*-области, отталкиваются назад положительным зарядом, а электроны, подошедшие из *n*-области, – отрицательным зарядом. Таким образом, образуется *p-n-переход*, представляющий собой слой полупроводника с пониженным содержанием носителей – так называемый обеднённый слой, который имеет относительно высокое электрическое сопротивление.

Свойства *p-n-структуры* изменяются, если к ней приложить внешнее напряжение. Если внешнее напряжение противоположно по знаку контактной разности потенциалов (рис.3, б), то дырки *p*-области, отталкиваясь от приложенного положительного потенциала внешнего источника, приближаются к границе между областями, компенсируют заряд части отрицательных ионов и сужают ширину *p-n-перехода* L со стороны *p*-области. Аналогично этому электроны *n*-области, отталкиваясь от отрицательного потенциала внешнего источника, компенсируют заряд части положительных ионов и сужают ширину *p-n-перехода* со стороны *n*-области. Потенциальный барьер сужается, через него начинают проникать дырки из *p*-области и электроны из *n*-области и через *p-n-переход* начинает течь ток.

С увеличением внешнего напряжения ток возрастает неограниченно, т. к. создаётся основными носителями, концентрация которых постоянно восполняется источником внешнего напряжения.

Полярность внешнего напряжения, приводящая к снижению потенциального барьера, называется прямой, или открывающей, а созданный ею ток – прямым. При подаче такого напряжения *p-n-переход* открыт.

Если к *p-n*- структуре приложить напряжение обратной полярности (рис.3, в), то эффект будет противоположным. Под действием электрического поля источника дырки *p*-области смещаются к отрицательному потенциалу внешнего напряжения, а электроны *n*-области – к положительному потенциалу. Таким образом, основные носители зарядов отодвигаются внешним полем от границы, увеличивая ширину *p-n-перехода*, который оказывается почти свободным от носителей зарядов. Электрическое сопротивление *p-n-перехода* при этом возрастает. Такая полярность внешнего напряжения называется обратной, запирающей. При подаче такого напряжения *p-n-переход* закрыт.

Тем не менее, при обратном напряжении наблюдается протекание малого тока *IOBP*.

Этот ток, в отличие от прямого, определяется носителями не примесной, а собственной проводимости, образующейся в результате генерации пар «свободный электрон – дырка» под воздействием температуры. Значение обратного тока практически не зависит от внешнего напряжения. Это объясняется тем, что в единицу времени количество генерируемых пар «свободных электрон – дырка» при неизменной температуре остаётся постоянным, и даже при U_{OBR} , в доли вольта все носители участвуют в создании обратного тока.

При подаче обратного напряжения *p-n-переход* уподобляется конденсатору, пластинами которого являются *p-* и *n-* области, разделённые диэлектриком. Роль диэлектрика выполняет приграничная область, почти свободная от носителей зарядов. Эту ёмкость *p-n-перехода* называют *барьерной*. Она тем больше, чем меньше ширина *p-n-перехода* и чем больше его площадь.

Особенности реальных *p-n-переходов*

В идеальном *p-n-переходе* обратный ток уже при сравнительно небольшом обратном напряжении не зависит от величины обратного напряжения. Однако при исследовании реальных *p-n-переходов* наблюдается достаточно сильное увеличение обратного тока при увеличении приложенного напряжения, причём в кремниевых *п/п* обратный ток на 23 порядка выше теплового. Такое отличие экспериментальных данных от теоретических объясняется термогенерацией носителей заряда непосредственно в области *p-n-перехода* и существованием канальных токов и токов утечки.

Канальные токи обусловлены наличием поверхностных энергетических состояний, искривляющих энергетические зоны вблизи поверхности и приводящих к появлению инверсных слоёв. Эти слои называют *каналами*, а токи, протекающие через переход между инверсным слоем и соседней областью – *канальными* токами.

Ёмкости p-n-перехода. Наряду с электропроводностью *p-n-переходы* имеют и определённую ёмкость. Ёмкостные свойства обусловлены наличием по обе стороны от границы электрических зарядов, которые созданы ионами примесей, а также подвижными носителями заряда, находящимися вблизи границы *p-n-перехода*.

Ёмкость *p-n-перехода* подразделяют на две составляющие: *барьерную*, отражающую перераспределение зарядов в *p-n-переходе* и *диффузионную*, отражающую перераспределение зарядов вблизи *p-n-перехода*. При прямом смещении перехода в основном проявляется диффузионная ёмкость, при обратном (режим экстракции) заряды вблизи *p-n-перехода* (в базе) меняются мало и основную роль играет барьерная ёмкость.

Так как внешнее напряжение влияет на ширину *p-n-перехода*, значение пространственного заряда и концентрацию инжектированных носителей зарядов, ёмкость *p-n-перехода* зависит от приложенного напряжения и его полярности.

Барьерная ёмкость обусловлена наличием в *p-n-переходе* донорной и акцепторной проводимостей, которые образуют как бы две заряженные обкладки конденсатора. При изменении запирающего напряжения, например увеличении, ширина *p-n-перехода* увеличивается и часть подвижных носителей заряда (электронов в области *n* и дырок в области *p*) отсасывается электрическим полем от слоёв, прилегающих к переходу.

Перемещение этих носителей зарядов вызывает ток. Этот ток становится равным нулю по окончании переходного процесса изменения границ *p-n-перехода*. Величину C , где S , l $U=0$; U_K – контактная разность потенциалов.

С увеличением приложенного обратного напряжения U барьерная ёмкость уменьшается из-за увеличения толщины перехода l .

Зависимость $C_{БАР} = f(U)$ называют *вольт-фарадной* характеристикой.

При подключении к *p-n-переходу* прямого напряжения барьерная ёмкость увеличивается вследствие уменьшения l . Однако в этом случае приращение зарядов за счёт инжекции играет большую роль и ёмкость *p-n-перехода* определяется в основном диффузионной составляющей ёмкости.

Диффузионная ёмкость отражает физический процесс изменения концентрации подвижных носителей заряда, накопленных в областях, вследствие изменения концентрации инжектированных носителей.

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

В основе *туннельного* пробоя лежит туннельный эффект, т. е. «просачивание» электронов сквозь потенциальный барьер, высота которого больше, чем энергия носителей заряда. Туннельный пробой наступает тогда, когда напряжённость электрического поля возрастает настолько, что становится возможным туннельный переход электронов из валентной зоны *p-типа* с электропроводностью одного типа в зону проводимости *p-типа* с электропроводностью другого типа (рис.10,а).

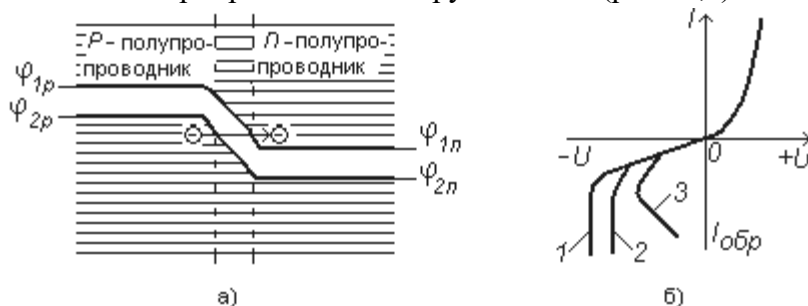


Рисунок 16 – Энергетическая зонная диаграмма, поясняющая туннельный переход электрона (а); ВАХ *p-n* перехода (б)

1 – лавинный пробой; 2 – туннельный пробой; 3 – тепловой пробой

Туннельный пробой чаще всего возникает у полупроводниковых приборов, имеющих узкий переход и малое значение удельного сопротивления, причём напряжённость поля должна быть достаточно высокой (более 10^5 В/см). При такой напряжённости энергетические зоны искривляются настолько, что энергия электронов валентной зоны полупроводника *p-типа* становится такой же как и энергия свободных электронов зоны проводимости полупроводника *n-типа*. В результате перехода электронов «по горизонтали» из области *p* в область *n* возникает *туннельный ток*. Начало туннельного пробоя оценивается по десятикратному превышению туннельного тока над обратным. При увеличении температуры напряжение, при котором возникает туннельный пробой, уменьшается. ВАХ туннельного пробоя представлена на рис.16, б.

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

Лавинный пробой возникает в высокоомных полупроводниках, имеющих достаточно большую ширину *p-n-перехода*. Напряжение лавинного пробоя зависит от температуры полупроводника и растёт с её увеличением из-за сокращения длины свободного пробега носителей зарядов. При лавинном пробое падение напряжения на *p-n-переходе* остаётся постоянным (1 на рис.16,б)

Тепловой пробой возникает в результате разогрева *p-n-перехода*, когда количество теплоты, выделяемой током в *p-n-переходе*, больше количества теплоты, отводимой от него. При разогреве *p-n-перехода* происходит интенсивная генерация электронно-дырочных пар и увеличение обратного тока через *p-n-переход*. Это, в свою очередь, приводит к дальнейшему увеличению температуры и обратного тока. В итоге ток через *p-n-переход* лавинообразно увеличивается и наступает тепловой пробой (3 на рис.16,б).

Следует заметить, что один вид пробоя может наступать как следствие другого вида пробоя.

Ход работы:

1. Изучить теоретическую часть и ответить на вопросы.

Контрольные вопросы и задания

1. Дать характеристику энергетических зон проводника, диэлектрика, полупроводника.
2. Классификация и требования к материалам.
3. Полупроводники.
4. Проводниковые материалы, резисторы.
5. Диэлектрические материалы и компоненты.
6. Магнитные материалы.
7. Сверхпроводники
8. Как изменить ширину запретной зоны в полупроводнике?
9. Что такое электронная и дырочная проводимость?
10. Каким образом получают полупроводники р- и п-типов?
11. Какая структура р-п-перехода: а) в равновесном состоянии; б) при прямом внешнем напряжении; в) при обратном внешнем напряжении?
12. За счёт чего в р-п-переходе образуется потенциальный барьер?
13. Что происходит в р-п-переходе при приложении к нему прямого и обратного напряжений?
14. Какие носители зарядов образуют прямой ток, а какие – обратный?
15. Основные отличия реального р-п-перехода от идеального.
16. Что такое термогенерация, канальные токи и токи утечки?
17. Причина появления барьерной ёмкости.
18. Причина туннельного пробоя р-п-перехода.

19. Чем вызывается лавинный пробой р-п-перехода?
20. Объяснить причину проявления теплового пробоя р-п-перехода.

Ход работы:

Содержание отчёта.

Контрольные вопросы

Практическая работа №14.

Тема 3.1. Элементная база электронных устройств.

Исследование полупроводниковых диодов.

Цель работы: снятие и анализ вольт-амперных характеристик (ВАХ) германиевого и кремниевого диодов; определение их основных параметров по характеристикам.

Перечень используемого оборудования: источник питания, содержащий генератор тока ГТ и генератор напряжения ГН2 с регуляторами «грубо» и «точно»;– цифровой вольтметр В7-27А или В7-16А;– микроамперметр Ф195;– миллиамперметр М2015 или аналогичный.

Теоретическая часть:

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.

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.

Особенности работы диода в электрической схеме определяются свойствами его вольт-амперной характеристики, вид которой показан на рис. 1.1.

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

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 $I_{\text{обр}}$ диода для ряда значений обратного напряжения $U_{\text{обр}}$.

Анализ типовых ВАХ германиевого и кремниевого диодов (рис. 1.1) позволяет сделать следующие выводы:

- прямое падение напряжения $U_{\text{пр}}$ на германиевом диоде меньше, чем на кремниевом при одном и том же прямом токе;

- напряжение включения $U_{ВКЛ1}$ германиевого диода составляет $(0,1 \div 0,15)$ В, а кремниевое $U_{ВКЛ2} = (0,3 \div 0,4)$ В;

- обратный ток I_O кремниевого диода значительно меньше обратного тока германиевого при одинаковых обратных напряжениях.

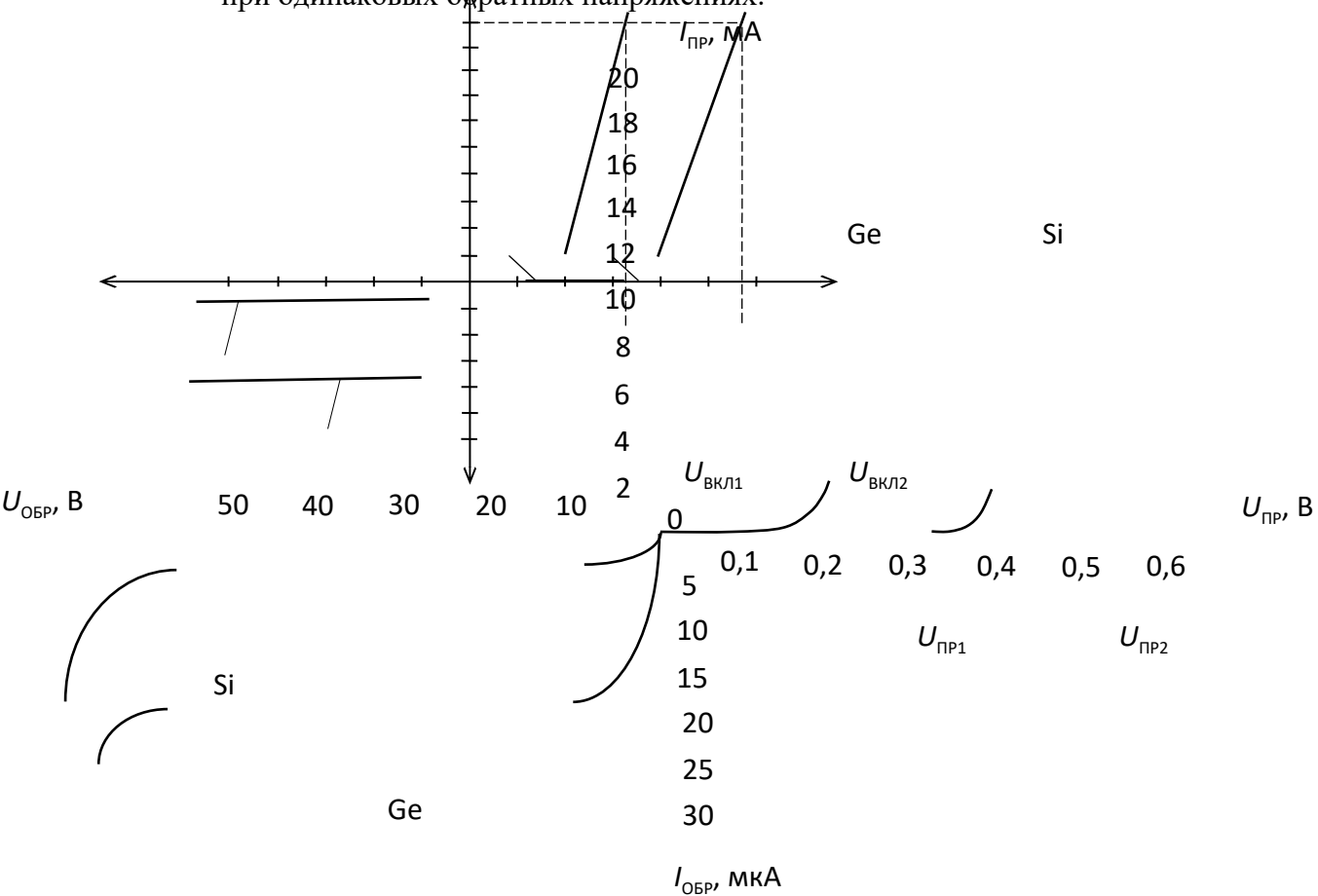


Рис. 1.1. Типовые вольт-амперные характеристики диодов

Эти выводы позволяют разграничить назначение германиевых и кремниевых диодов. Германиевые диоды применяют для обработки сигналов малой амплитуды (до 0,3 В). Кремниевые диоды при подаче на них сигналов с амплитудой меньше 0,3 В одинаково плохо проводят ток как в прямом, так и в обратном направлениях. Кремниевые диоды распространены шире, чем германиевые, и применяются в тех случаях, когда большой обратный ток недопустим. Кроме того, они сохраняют работоспособность до температуры окружающей среды $+150^{\circ}\text{C}$, тогда как германиевые могут работать только до $+70^{\circ}\text{C}$.

Основными параметрами выпрямительных диодов являются:

- прямой номинальный ток I_H - это ток, который длительно может протекать через отпечтый диод и не перегреть его;

- прямое постоянное напряжение $U_{\text{пр}}$ - это падение напряжения на открытом диоде при протекании через него прямого тока $I_{\text{н}}$;

- напряжение включения $U_{\text{вкл}}$ - это малое прямое напряжение, при котором начинает отпираться диод, т.е. появляется прямой ток;

- максимально допустимое обратное напряжение $U_{\text{обр.мах.доп}}$ - это напряжение, которое еще не вызывает пробоя запертого диода, превышать это напряжение не допустимо;

- постоянный обратный ток $I_{\text{о}}$ - это тепловой ток запертого диода при $U_{\text{обр.мах.доп}}$;

- дифференциальные сопротивления открытого $R_{\text{отп}}$ и запертого $R_{\text{зап}}$ диода, которые легко определяются по ВАХ на соответствующих рабочих участках:

$$R_{\text{отп}} = \frac{dU_{\text{пр}}}{dI_{\text{пр}}} = \frac{U_{\text{пр}}}{I_{\text{пр}}} \quad 1_{\text{цы}} 10^{\text{ки}} \text{ Ом};$$

$$R_{\text{зап}} = \frac{dU_{\text{обр}}}{dI_{\text{обр}}} = \frac{U_{\text{обр}}}{I_{\text{о}}} \quad 1_{\text{цы}} 10^{\text{ки}} \text{ МОм}.$$

- максимально допустимая мощность рассеиваемая на диоде $P_{\text{мах.доп}}$ - это мощность, которая не вызывает чрезмерного разогрева диода, а следовательно и теплового пробоя.

Превышение $U_{\text{обр.мах.доп}}$ переводит диод в режим электрического пробоя. Различают электрический и тепловой пробой p - n -перехода. Электрический пробой может быть лавинным и туннельным и не сопровождается разрушением p - n -перехода. Тепловой пробой, как правило, приводит к разрушению p - n -перехода и выводу диода из строя.

Ход работы:

ОПИСАНИЕ СТЕНДА

2.1. Приборы, используемые в работе:

– источник питания, содержащий генератор тока ГТ и генератор напряжения ГН2 с регуляторами «грубо» и «точно»;

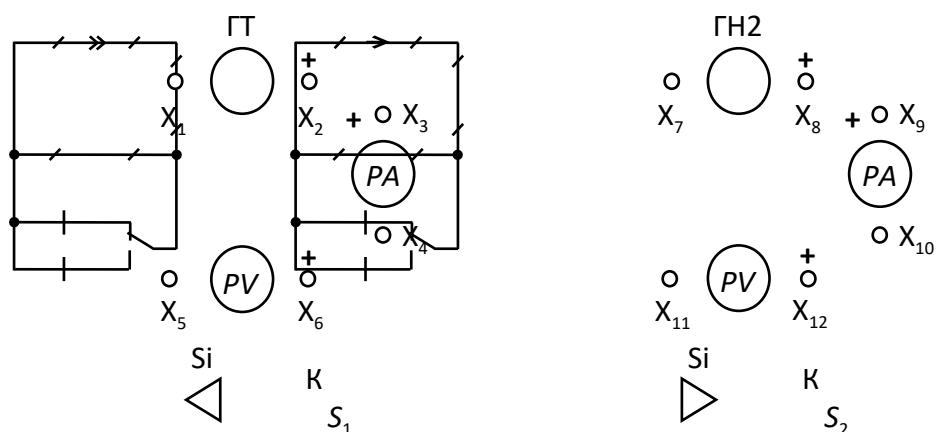
– цифровой вольтметр В7-27А или В7-16А;

– микроамперметр Ф195;

– миллиамперметр М2015 или аналогичный.

2.2. Испытательный стенд с мнемосхемой, показан на рис. 1.2, а и б.

2.3. Перед измерениями собрать схему, подключив к соответствующим гнездам измерительные приборы и источники питания ГТ или ГН2.



а) прямое
включение

б) обратное
включение

Рис. 1.2. Схема лабораторной
установки

ХОД РАБОТЫ

3.1. Исследование прямой ветви вольт-амперной характеристики диода.

Прямая ветвь ВАХ диода, т.е. зависимость прямого тока $I_{\text{пр}}$ от напряжения $U_{\text{пр}}$ снимается с помощью схемы, расположенной в левой верхней части лабораторного стенда (рис. 1.2, а).

3.1.1. Собрать схему для снятия ВАХ диодов, включив измерительные приборы и генератор тока в соответствующие гнезда стенда, соблюдая полярность: миллиамперметр Ф195, переключатель пределов измерений которого должен быть предварительно установлен в положение «10 мА», включается в гнезда X_3 и X_4 ; цифровой вольтметр, предел измерения которого должен быть установлен в положение «1 В» постоянного напряжения, включается в гнезда X_5 и X_6 ; с помощью соединительных проводов, расположенных в верхней части лабораторной панели, подключить генератора тока ГТ к соответствующим клеммам источника питания лабораторной установки.

Внимание: строго соблюдать полярность подключения ГТ; регуляторы ГТ «грубо» и «точно» установить в крайнее левое положение.

3.1.2. Включить источник питания.

3.1.3. Регулируя ручками «грубо» и «точно», расположенными на корпусе источника питания лабораторной установки, величину выходного тока ГТ в диапазоне от 0 до 10 мА снять 10÷12 точек прямой ветви ВАХ германиевого и кремниевых диодов.

Диод выбирается с помощью переключателя S , расположенного на стенде. В положении переключателя, помеченном буквой «К», подключается кремниевый диод, в положении «Г» - германиевый диод.

3.1.4. Результаты измерений занести в табл. 1.1.

Таблица 1.1

$I_{\text{пр}}, \text{мА}$		0	0,02	0,05	0,1	0,2	0,3	0,5	1,0	...	10
$U_{\text{пр}}, \text{В}$	Германиевый диод										
	Кремниевый диод										

3.2. Исследование обратной ветви вольт-амперной характеристики диода.

Обратная ВАХ диода, т.е. зависимость обратного тока $I_{\text{ОБР}}$ от обратного напряжения $U_{\text{ОБР}}$ снимается с помощью схемы, расположенной в правой части лабораторного стенда (см. рис. 1.2, б).

3.2.1. Собрать схему для снятия обратной ВАХ диода, включив измерительные приборы и генератор напряжения ГН2 в соответствующие гнезда стенда, соблюдая полярность:

- предел измерения микроамперметра Ф195 установить в положение «10 мкА» при исследовании кремниевого диода. Затем подключить его к гнездам X_9 и X_{10} ;

- предел измерения цифрового вольтметра переключить в положение «10 В» и подключить его к гнездам X_{10} и X_{11} ;

- регуляторы источника напряжения ГН2 «грубо» и «точно» установить в минимальное положение (крайнее левое) и с помощью соединительных проводов подключить источник ГН2 к испытательному стенду.

Регулируя ручками «грубо» и «точно» величину выходного напряжения ГН2 в диапазоне от 0 до 15 В снять 10÷12 точек обратной ветви ВАХ германиевого и кремниевого диодов. Шаг измерения $\Delta U_{\text{ОБР}}$ можно выбирать произвольно. Результаты измерений занести в табл. 1.2.

Таблица 1.2

$U_{\text{ОБР}}, \text{В}$		0	1	2	4	6	...	15
$I_{\text{ОБР}}, \text{мкА}$	Германиевый диод							
	Кремниевый диод							

3.3. Построить графики зависимостей $I_{\text{ПР}} = f(U_{\text{ПР}})$ и $I_{\text{ОБР}} = f(U_{\text{ОБР}})$ в одних координатных осях (аналогично рис. 1.1): положительная полуось абсцисс - $U_{\text{ПР}}$, положительная полуось ординат $I_{\text{ПР}}$; отрицательная полуось абсцисс - $U_{\text{ОБР}}$, отрицательная полуось ординат - $I_{\text{ОБР}}$. Шкалы на полуосях (положительной и отрицательной) выбираются не одинаковыми.

3.4. По полученным экспериментальным данным определить основные эксплуатационные параметры исследованных диодов: $I_{\text{Н}}$; $U_{\text{ПР}}$; $R_{\text{ОТП}}$, $R_{\text{ЗАП}}$; $U_{\text{ВКЛ}}$, $I_{\text{О}}$ для германиевых и кремниевых диодов.

3.5. Сопоставить полученные данные и сделать выводы.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

4.1. Схема исследования.

4.2. Таблицы, графики зависимостей $I = f(U)$.

4.3. Расчетные параметры и выводы по результатам исследований.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какова структура и принцип работы диода?
2. Чем обусловлены вентильные свойства диода?
3. При каких условиях диод отперт (заперт)?
4. Чем отличаются параметры диода в схемах на рис. 1.2 и почему?

5. Как влияет температура на величину тока $I_{\text{обр}}$ и почему?
6. Поясните, как определялись основные параметры диода?
7. Поясните работу диода в простейших схемах заданных преподавателем.

Практическая работа № 15.

Тема 3.1. Элементная база электронных устройств.

Транзистор и измерение его статического коэффициента усиления.

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:

Транзистор изготовлен из пластинки (кристалла) германия, в грани которой вплавлены атомы индия (рис. 104). 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. 105).

В зависимости от комбинации включения областей с p - и n -проводимостями различают транзисторы структуры $n-p-n$ (рис. 105) и $p-n-p$ (рис. 106). 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».

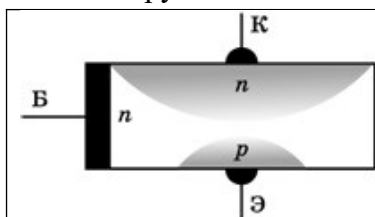


Рис. 104

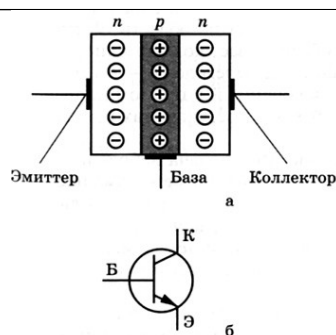


Рис. 105

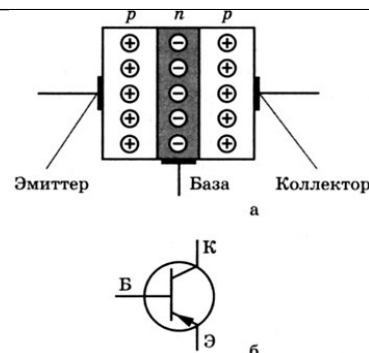


Рис. 106

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. 107) или катодами (рис. 108). При этом точка соединения диодов соответствует выводу базы транзистора.

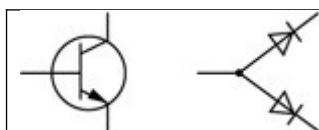


Рис. 107

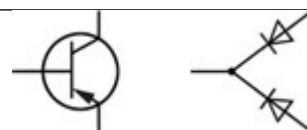


Рис. 108

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

область базы.

При подключении источника питания (рис. 109) переход Э — Б включен в прямом (пропускном) направлении и через него протекает ток. Базовая область в транзисторе имеет малую 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.

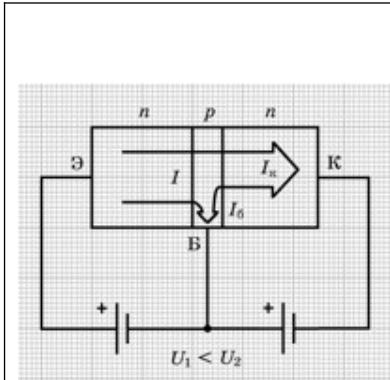


Рис. 109

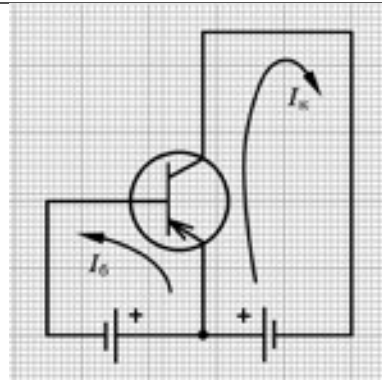


Рис. 110

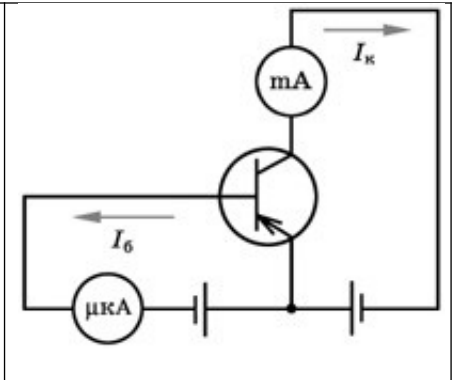


Рис. 111

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. 109) 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. 110) 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. 111). 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.

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.

П р и м е ч а н и е . 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.

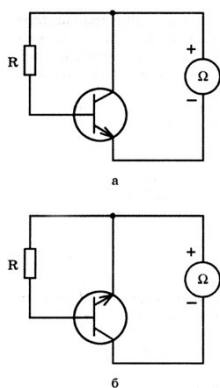


Рис. 112

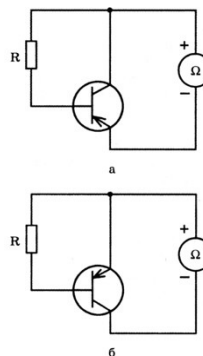


Рис. 113

6. 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.

Контрольные вопросы

Практическая работа № 16.

Тема 3.1. Элементная база электронных устройств.

Практическая работа по теме «Полевые транзисторы».

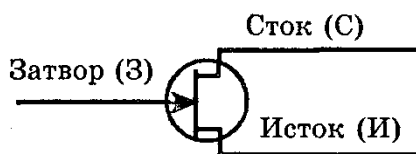
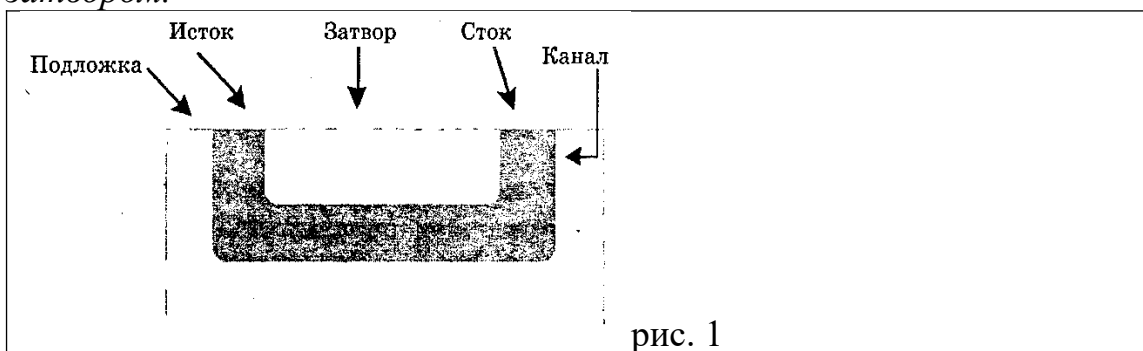
Цель работы: изучить свойства полевого транзистора. Снять и исследовать стоковые и стокзатворную характеристики. Рассчитать основные параметры.

Перечень используемого оборудования: Оборудование лабораторного стенда СЛИ - 1. В соответствии с приведенной принципиальной электрической схемой

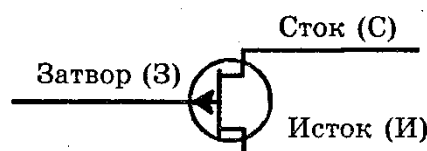
Теоретическая часть:

Полевой транзистор – это полупроводниковый прибор, имеющий три электрода: исток, сток и затвор. Между истоком и стоком в кристалле полупроводника, из которого выполнен полевой транзистор, расположен канал, через который течёт ток транзистора. Канал выполняется из полупроводника одного типа – n или p . Управление током, текущим через канал, осуществляется путём изменения проводимости канала, которая зависит от напряжения между затвором и истоком. В отличие от биполярных транзисторов, в которых ток транзистора от эмиттера к коллектору течёт последовательно через два p - n -перехода, в полевых транзисторах ток течёт через канал, который образуется в полупроводнике одного типа проводимости, и через p - n -переход не течёт. Так как направление тока в полевом транзисторе – от истока – через канал – к стоку, а управление током осуществляется напряжением между затвором и истоком, то исток соответствует эмиттеру биполярного транзистора; сток – коллектору, а затвор – базе.

Изменение проводимости канала может осуществляться двумя способами. В зависимости от этого полевые транзисторы делятся на два основных вида: транзисторы с управляющим p - n -переходом и транзисторы с изолированным затвором.



Полевой транзистор
с p - n -переходом и
каналом n -типа



Полевой транзистор
с p - n -переходом и
каналом p -типа

рис

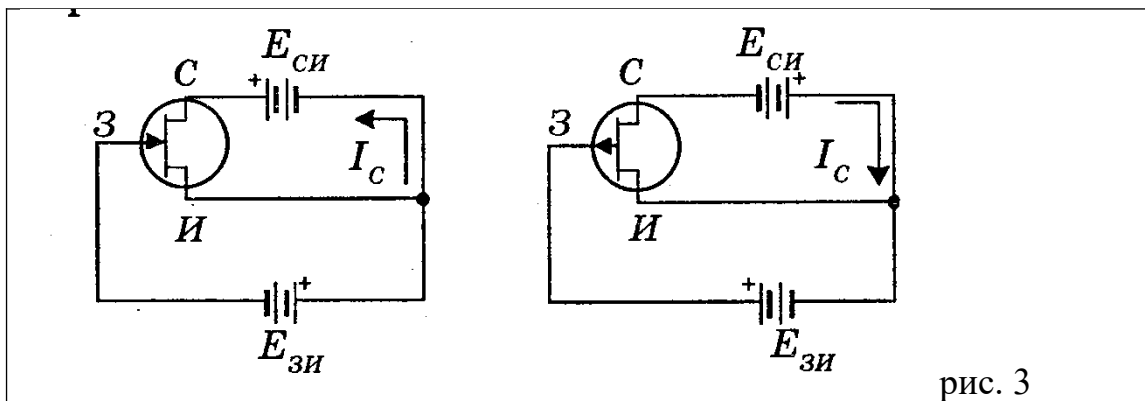


рис. 3

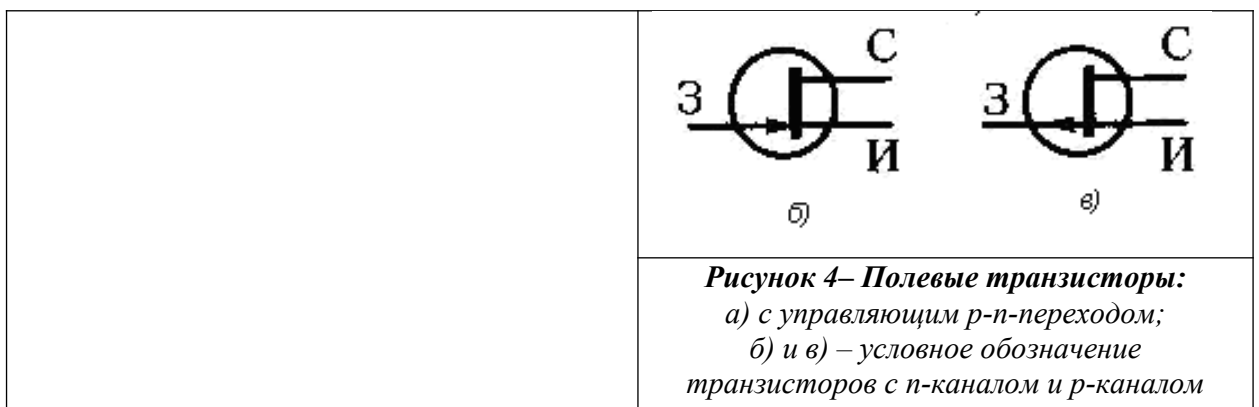
Полевые транзисторы с управляющим p - n -переходом

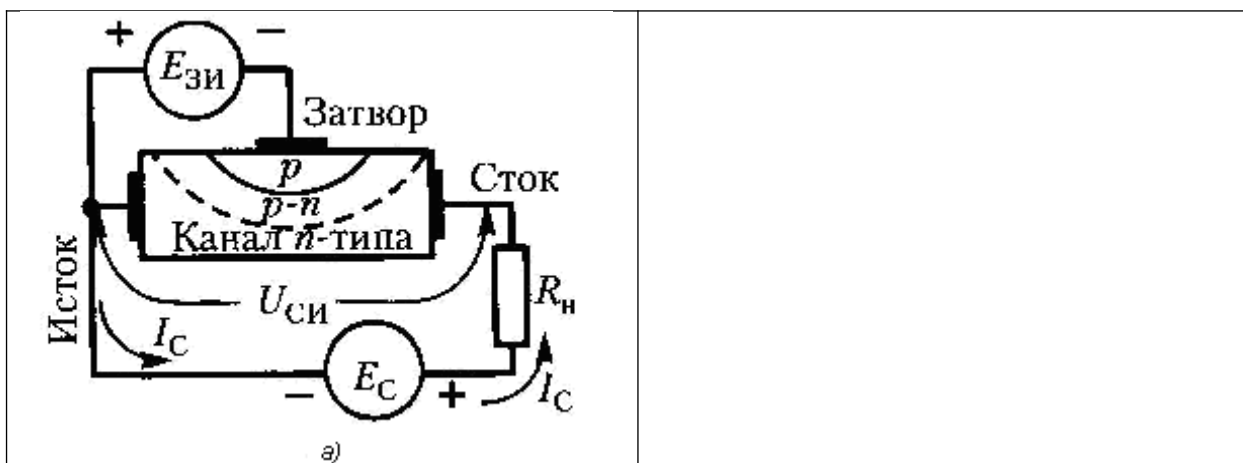
В полевых транзисторах с управляющим p - n -переходом управление током транзистора достигается путём изменения сечения канала за счёт изменения области, занимаемой этим переходом. Управляющий p - n -переход образуется между каналом и затвором, которые выполняются из полупроводников противоположных типов проводимости. Так, если канал образован полупроводником n -типа (рис. 4, а), то затвор – полупроводником p -типа. Напряжение между затвором и истоком всегда подаётся обратной полярности, т. е. запирающей p - n -переход. При подаче напряжения обратной полярности область, занимаемая p - n -переходом, расширяется. При этом расширяется и область, обеднённая носителями заряда, а значит, сужается область канала, через которую может течь ток. Причём, чем больше значение запирающего напряжения, тем шире область, занимаемая p - n -переходом, и тем меньше сечение и проводимость канала. Условные обозначения транзисторов с разными каналами показаны на рис. 4 б, в.

В отличие от биполярного, работа полевого транзистора может также описываться непосредственной зависимостью выходного параметра – тока стока от входного – управляющего напряжения между затвором и истоком.

Эти характеристики называются *передаточными (переходными)*, или *стокзатворными*.

Так как управляющий p - n -переход всегда заперт, у полевого транзистора практически отсутствует входной ток. Благодаря этому они имеют очень высокое входное сопротивление и практически не потребляют мощности от источника управляющего сигнала. Это свойство относится не только к транзисторам с управляющим p - n -переходом, но и ко всем полевым транзисторам, что выгодно отличает их от биполярных с точки зрения более высокого КПД.





Полевые транзисторы с изолированным затвором

Если в полевых транзисторах с управляющим p - n -переходом затвор имеет электрический контакт с каналом, то в полевых транзисторах с изолированным затвором такой контакт отсутствует. В этих транзисторах (рис. 5, а) затвор представляет собой тонкую плёнку металла, изолированного от полупроводника. В зависимости от вида изоляции различают МДП и МОП-транзисторы. Аббревиатура «МДП» расшифровывается как «металл – диэлектрик – полупроводник», а «МОП» – как «металл – оксид – полупроводник». В последнем случае под «оксидом» понимается двуоксид кремния

SiO_2 , который является высококачественным диэлектриком. Исток и сток формируют в виде сильно легированных областей полупроводника. За счёт этого области стока и истока имеют высокую концентрацию носителей, что отмечено на рисунке знаком «+». Как МДП-, так и МОП-транзисторы могут быть выполнены с каналом *p*- и *n*-типов. Канал в этой группе транзисторов может быть *встроенным* (т. е. созданным при изготовлении) и *индуцированным* (т. е. наводящимся под влиянием напряжения, приложенного к затвору).

Электроды стока и истока располагаются по обе стороны затвора и имеют контакт с полупроводниковым каналом. Ток утечки затвора пренебрежимо мал даже при повышенных температурах. Полупроводниковый канал может быть обеднен носителями зарядов или обогащен ими. При обедненном канале электрическое поле затвора повышает его проводимость, поэтому канал называется *индуцированным*. Если канал обогащен носителями зарядов, то он называется *встроенным*. Электрическое поле затвора в этом случае приводит к обеднению канала носителями зарядов.



Рисунок 5 – Полевой транзистор:
а) с изолированным затвором

Этот вид транзистора отличается от предыдущего тем, что при отсутствии напряжения на затворе канал отсутствует, так как n -области истока и стока образуют с p -подложкой два p - n -перехода, включённые навстречу друг другу, и, значит, при любой полярности напряжения $U_{си}$ один из переходов заперт (рис. 6, а).

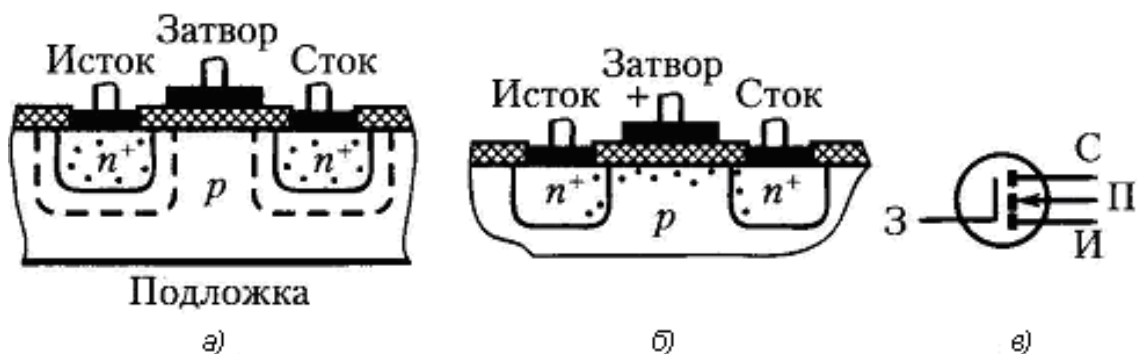


Рисунок 6– Полевой транзистор:

а) с индуктивным каналом в исходном состоянии; б) при приложенном напряжении на затворе; в) условное обозначение

Если же на затвор подать напряжение больше порогового $U_{зи} > U_{зи\text{ пор}}$, то созданное им электрическое поле вытягивает электроны из n^+ -областей (и в какой то мере из подложки), образуя тонкий слой n -типа в приповерхностной области p -подложки (рис. 6,б). Этот слой соединяет исток и сток, являясь каналом n -типа. От подложки канал изолирован возникшим обеднённым слоем.

Таким образом, полевые транзисторы с индуцированным n -каналом (n -МОП-транзисторы), в отличие от рассмотренных ранее полевых транзисторов, управляются только положительным сигналом $U_{зи}$. Значение порогового напряжения у них $0,1 \div 0,2$ В.

Значительно больше пороговое напряжение у p -МОП- транзистора, принцип работы которого аналогичен n -МОП- транзистору. Но в связи с тем, что носителями в нём служат дырки, а не электроны, полярность всех напряжений у этого транзистора противоположна n -МОП- транзистору.

Значение порогового напряжения этого типа транзисторов составляет $2 \div 4$ В.

Особенностью таких транзисторов является то, что форма переходной характеристики такая же как входная характеристика у биполярных транзисторов.

Как и биполярные, полевые транзисторы можно включать по схеме с общим затвором (ОЗ), общим истоком (ОИ) и общим стоком (ОС). Наиболее распространена схема включения с ОИ, которая, подобно схеме с ОЭ биполярных транзисторов, обеспечивает одновременно усиление по току, напряжению и мощности.

Преимущества полевых транзисторов

К преимуществам полевых транзисторов следует отнести:

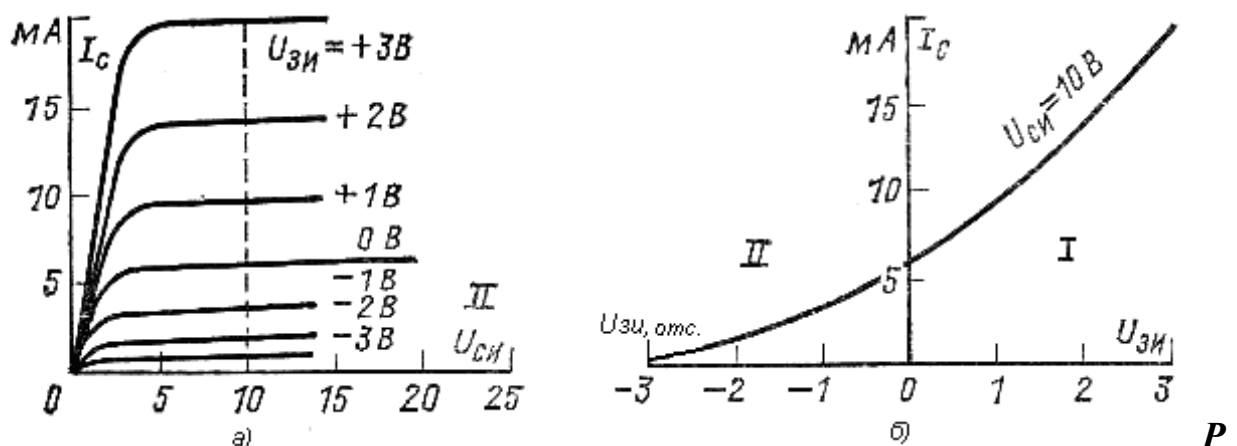
- 1) высокое входное сопротивление в схеме с ОИ;
- 2) малый уровень собственных шумов, т. к. перенос тока осуществляют только основные для канала носители и, следовательно, нет рекомбинационного шума;
- 3) высокая устойчивость против температурных и радиоактивных воздействий;
- 4) высокая плотность расположения элементов при изготовлении интегральных микросхем.

В транзисторах со встроенным каналом ток в цепи стока протекает и при нулевом напряжении на затворе. Для его прекращения необходимо к затвору приложить положительное (при структуре с каналом *p-типа*) или отрицательное (при структуре с каналом *n-типа*), равное или большее $U_{зиотс}$ (рис.7,б).

Отметим также интересную особенность полевых транзисторов: в принципе исток и сток в транзисторах равноправны, т. е. в зависимости от полярности приложенного напряжения исток и сток могут меняться местами. На этом свойстве основано использование полевых транзисторов в качестве электронных ключей вместо обычных контактных переключателей.

Полевые транзисторы широко используются в усилителях, генераторах, преобразователях сигналов и другой радиоэлектронной аппаратуре, а МОП- транзисторы являются основой для разработки всех современных средств вычислительной техники и аппаратуры цифровой обработки информационных сигналов.

Сравнивая условные обозначения полевых транзисторов, заметим, что стрелка в них *всегда направлена от p-области к n-области*, что позволяет легко установить, например, тип канала транзистора.



исунок 7 – Характеристики полевого транзистора с изолированным затвором со встроенным каналом

а) выходная; б) переходная. В области I транзисторов работает с индуцированным каналом, а в области II – в режиме со встроенным каналом

Основные параметры полевых транзисторов и их ориентировочные значения

1. Крутизна характеристики

$$S = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{ЗИ}}$$

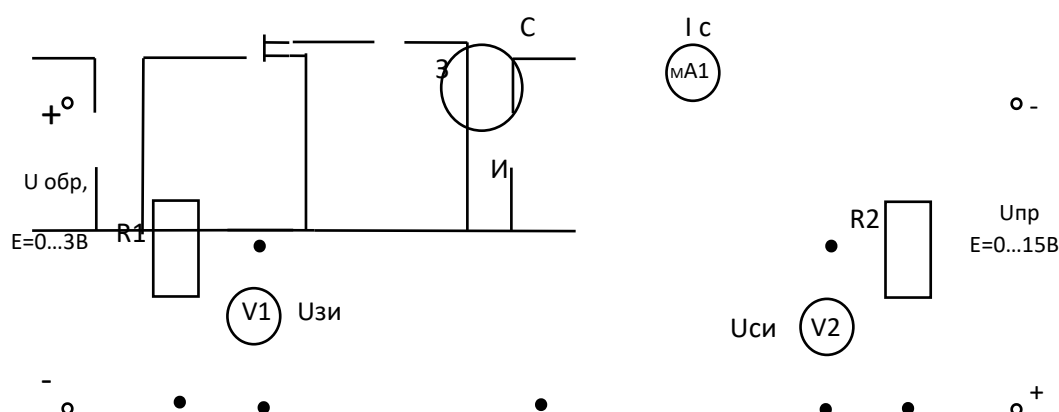
при $U_{ЗИ} = \text{const}$, $S = 0,1 - 500 \text{ mA/V}$.

2. Начальный ток стока $I_{C \cdot \text{нач}}$ – ток стока при нулевом напряжении, у транзисторов с управляющим р-п- переходом составляет $0,2 - 600 \text{ mA}$; с технологически встроенным каналом – $0,1 - 100 \text{ mA}$; с индуцированным каналом – $0,01 - 0,5 \text{ мкА}$.
3. Напряжение отсечки $U_{ЗИ \cdot \text{отс}}$ ($0,2 - 10 \text{ В}$).
4. Пороговое напряжение $U_{ЗИ \cdot \text{пор}}$ ($1 - 6 \text{ В}$).
5. Сопротивление сток – исток в открытом состоянии $R_{СИ \cdot \text{отк}}$ ($2 - 300 \text{ Ом}$).
6. Постоянный ток стока $I_{C \cdot \text{max}}$ (от 10 mA до $0,7 \text{ A}$).

Ход работы:

Собрать принципиальную электрическую схему.

Принципиальная электрическая схема измерений



3.2. Рассчитать цену деления измерительных приборов и записать в Табл.1

Табл.1

Наименование прибора	Предел измерения	Цена деления
PV1 В	5	
PA1 мА	10	
PV2 В	50	

3.3. После проверки схемы преподавателем, включить стенд в следующей последовательности:

3.4. Установить полярность источников **E1 0...3 В** и **E2 0...15 В** и вольтметров **PV1, PV2**; **mA 1** в соответствии с обозначением на схеме.

3.5. Снять стоковые характеристики транзистора для чего:

3.5.1. Установить напряжение источника **E2 0...3В** по вольтметру **PV1** **Uзи= 0В**.

3.5.2. Изменяя значения **Uси** на источнике **E1 0...15 В** по **PV2** согласно табл.2 и записывать значения **Iс** по миллиамперметру **РА1**.

3.5.3. Аналогично измерение **Iс** произвести при **Uзи= 1В**.

3.6. Снять стоко-затворную характеристику транзистора для чего:

3.6.1. Установить на источнике **E1 0...15 В** по **PV2** **Uси=5В**

3.6.2. Изменяя значения **Uзи** на источнике **E1 0...3 В** по **PV1** **Uзи** согласно табл.2 и записывать значения **Iс** по миллиамперметру **РА1**

3.6.3. . Аналогично измерение **Iк** произвести при **Iб= 0,3мА**

4 .Таблица 2. измерений и расчетов.

№ п/ п	Замеры и расчеты							
Стоковые характеристики								
1	Uси В		0	4	6	8	10	12
2	Uзи=0В	Iс мА						
3	Uзи=1В	Iс мА						
Стоко-затворная характеристика								
1	Uзи В		0	0,4	0,8	1,4	2,0	2,6
2	Uси=5В	Iс мА						

5. Расчетные формулы:

$S = \Delta I_c / \Delta U_{зи}$ при $U_{си} = \text{const}$; $R_i = \Delta U_c / \Delta I_c$ при $U_{зи} = \text{const}$; $\mu = S * R_i$

6. По данным замеров и расчетов построить графики зависимостей:

$I_c = f(U_{си})$; $I_c = f(U_{зи})$

7. Отчет должен содержать:

7.1. Наименование работы

7.2. Цель работы

7.3. Графики

7.4. Ответы на контрольные вопросы

К каждому отчету должна прилагаться ксерокопия описания лабораторной работы.

8 .Контрольные вопросы:

1. Поясните структуру полевых транзисторов, наименование и назначение электродов.
2. В чем различие в управлении полевых транзисторов от биполярных?
3. Классификация полевых транзисторов.
4. Приведите условное и графическое обозначение полевых транзисторов различных типов.
5. Принципиальное отличие структуры р-п-переходов биполярных и полевых транзисторов.
6. Способ изменения типа проводимости у полевых транзисторов.
7. Схемы включения полевых транзисторов.
8. Структура и принцип работы транзистора с управляющим р-п-переходом.
9. Структура и принцип работы транзистора с индуцированным затвором (каналом).
10. Разница в структуре МДП- и МОП-транзисторов.
11. Особенности структуры транзисторов со встроенным и индуцированным каналом.
- 12.

Практическая работа № 17.

Тема 3.2. Электронные усилители.

Практическая работа по теме «Усилители».

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

Теоретическая часть:

Усилительные устройства»

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.

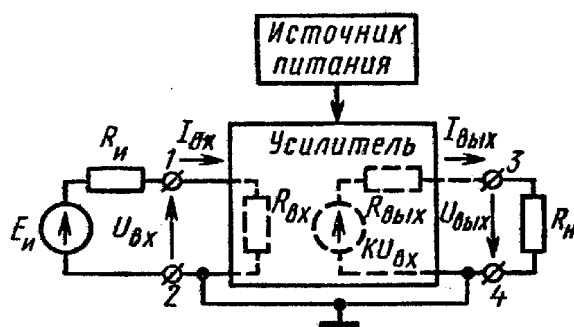


Рис.1 Обобщенная схема усилителя

В выходной цепи усилителя действует усиленный сигнал, что отражено на схеме наличием источника напряжения $U_{\text{вых}}$ 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 усиляемых 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 усиливаемого 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.



Рис.2 Амплитудно-частотная характеристика 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 ди-

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.

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 усиливаемого 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 усиливаемого 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.

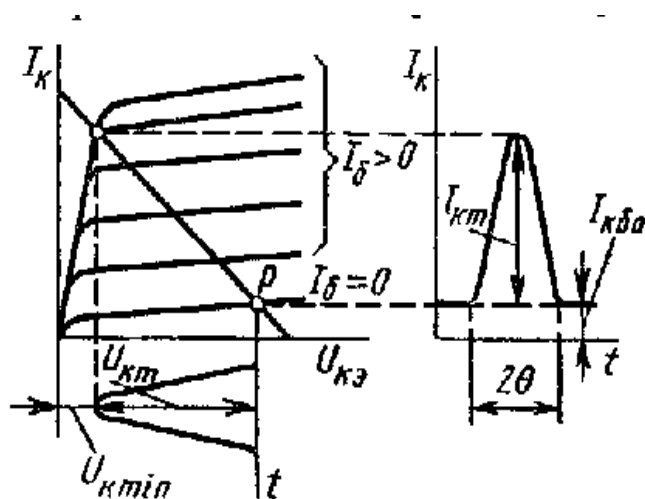


Рис.3 К пояснению режимов работы усилителей

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

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

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.

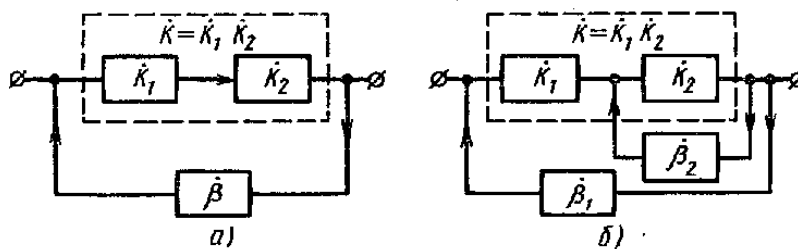


Рис. 4. Однопетлевая (а) и многопетлевая (б) обратные связи

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

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

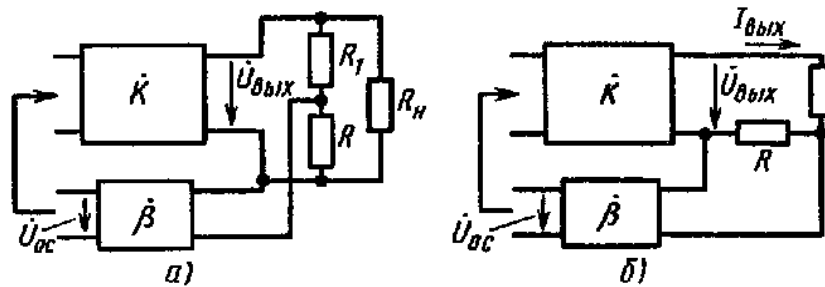


Рис.5 Обратные связи по напряжению (а) и по току (б)

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).

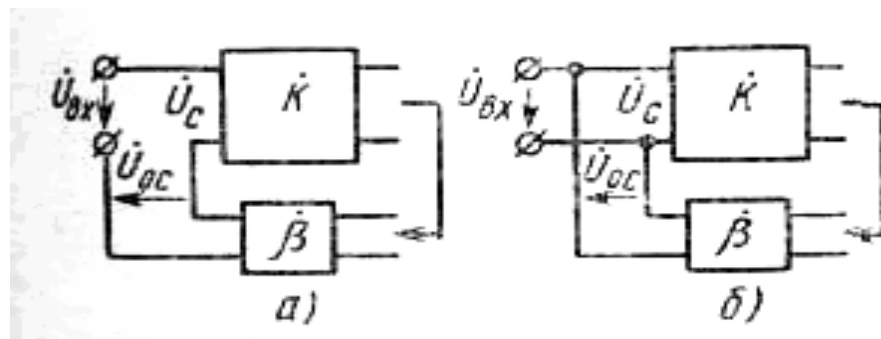


Рис.6 Обратные связи: последовательная (а) и параллельная (б)

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

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

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.

Операционные усилители

ОУ 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

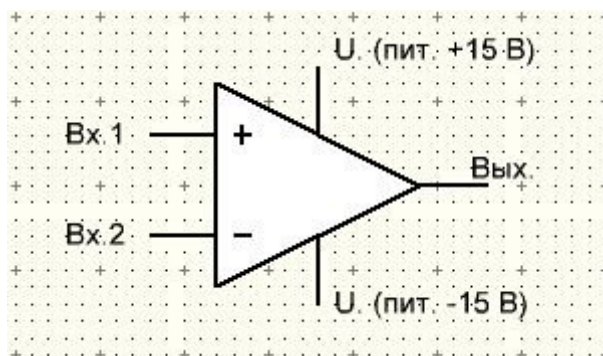
Обратная связь ОУ: положительная обратная связь, отрицательная обратная связь

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 K544UD2AP 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).

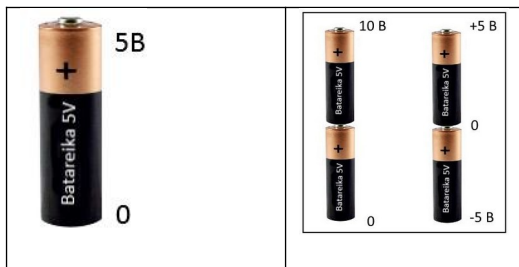
Входы ОУ работают так, что если величина на неинвертирующем входе окажется больше, чем на инвертирующем, то на выходе будет максимальное положительное значение +15В. Если на инвертирующем входе величина напряжения окажется более положительной, то на выходе будем наблюдать максимум отрицательной величины, 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

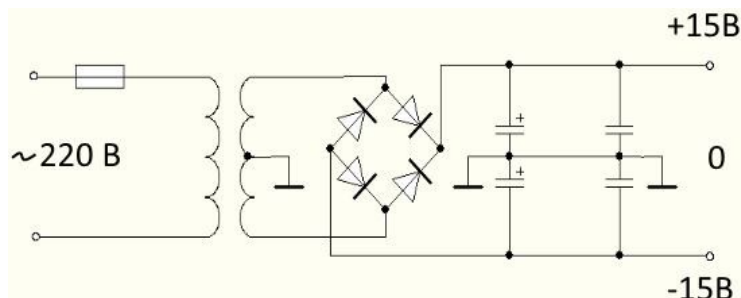


Обычно примеры проще всего приводить на пальцах, но мы возьмем пальчиковые батарейки. Допустим у нас есть обычная пальчиковая батарейка (батарейка типа АА). У нее есть два полюса плюсовой и минусовой. Когда минусовой полюс мы принимаем за ноль, считаем нулевой точкой отсчета, то соответственно плюсовой 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

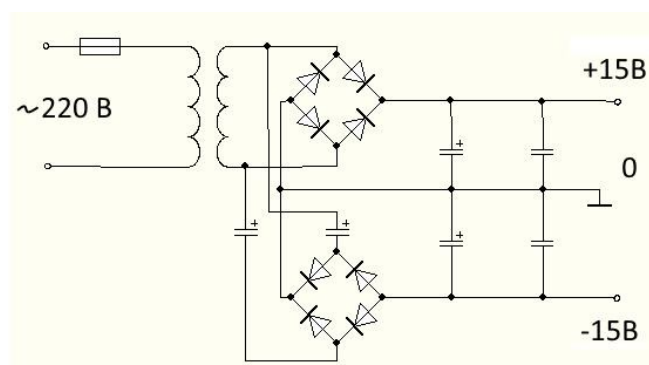
Схема с трансформатором, с отводом от «средней» точки



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 нестабильности. С другой стороны, положительная обратная связь не уменьшает коэффициент усиления операционного усилителя, что бывает полезно. А нестабильность 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 стабильность 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. Назовите три основных типа усилительных каскадов на биполярных транзисторах.
2. В чем заключаются основные различия усилителей классов А и В?
3. Назовите три основных типа усилительных каскадов на полевых транзисторах.
4. Почему усилительный дифференциальный каскад постоянного тока не усиливает электрические помехи (атмосферные, сетевые и т.д.)?
5. Каков порядок значений входного и выходного сопротивлений и коэффициента усиления напряжения операционных усилителей?
6. Перечислите свойства идеального операционного усилителя.

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

1. Каков сопротивление должна иметь цепь обратной связи R_{oc} неинвертирующего усилителя (см. рис. 15.19), чтобы его коэффициент усиления напряжения равнялся $K_u = 50$ при сопротивлении $R_1 = 1,5$ кОм?
 Ответ: 74,5 кОм.
2. Чему равно входное сопротивление инвертирующего усилителя (см. рис. 15.21) при значениях параметров элементов: $R_1 = 1$ кОм, $R_{oc} = 10$ кОм, $R_u = 2$ кОм, ОУ идеальный?
 Ответ: 1 кОм.

Практическая работа № 18.

Тема 3.2. Электронные усилители

Исследование усилителя на биполярном транзисторе.

Цель работы: Экспериментальное подтверждение теоретических положений по принципу действия усилителей.

Теоретическая часть:

Рассмотрим простейшую схему усилителя на БТ п-р-п- типа, включенного по схеме с общим эмиттером (рис.7,а).

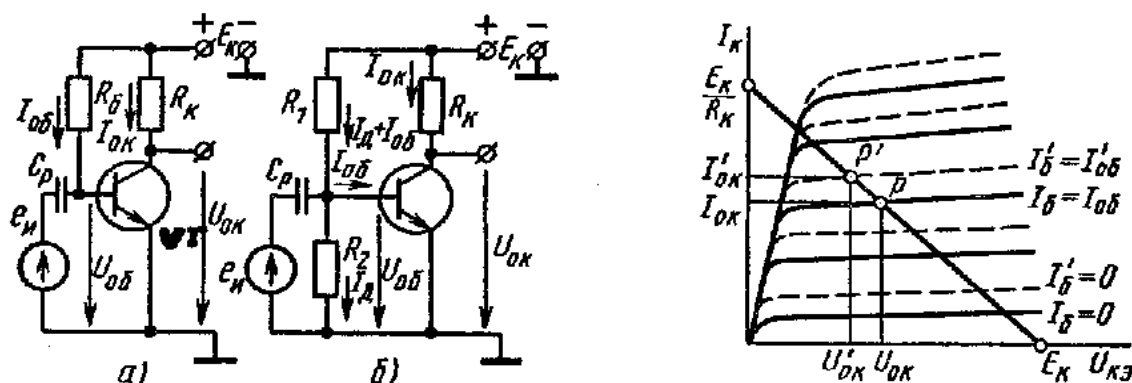


Рис.7 Схема усилителя на БТ с общим эмиттером

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_B – резистор, определяющий ток базы I_B и тем самым задающий режим работы транзистора по постоянному току;

R_k – резистор, предназначенный для выделения усиленного сигнала; C_p – 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_p 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.

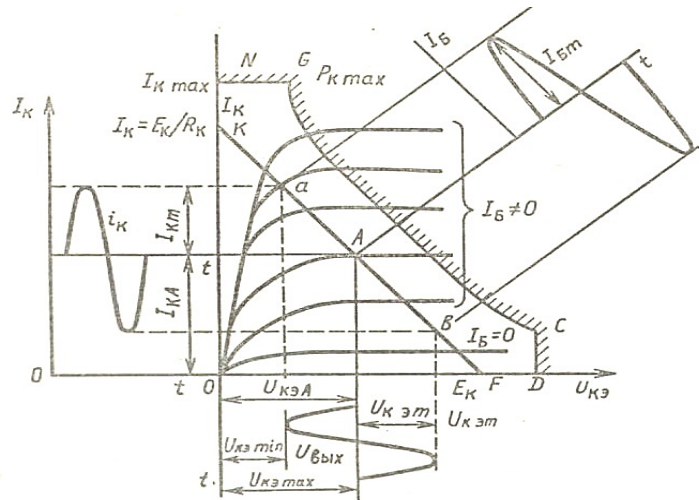


Рис.8 Диаграммы, поясняющие принцип действия усилителя

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 $U_{KЭ}$.

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

$$U_{KЭ} = E_K - I_K R_K.$$

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 А и напряжения $U_{кэ}$ А.

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 смещения 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).

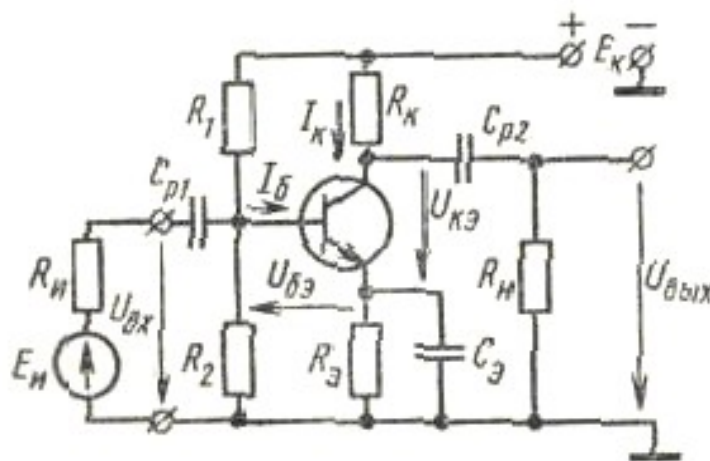


Рис.9 Схема усилителя с цепями смещения

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_3 (рис.9). Этот резистор создает отрицательную обратную связь по току. Напряжение на эмиттерном переходе определяется соотношением:

$$U_{бэ} = \varphi_б - \varphi_э = \varphi_б - I_э R_э.$$

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_3 шунтируется конденсатором C_3 . Емкость конденсатора выбирается из условия

$$X_c = 1 / \omega C_3 \ll R_э ,$$

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 О.
- 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 $U_{кэ}$, 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:

$$K_u = U_{вых}/U_{вх}.$$

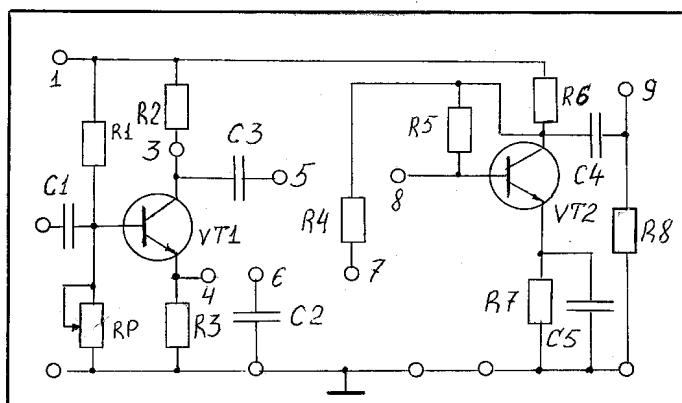


Рис.10 Двухкаскадный усилитель

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 R_P .

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.

Контрольные 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.
7. Особые преимущественные отличия дифференциального каскада.

Практическая работа № 19.

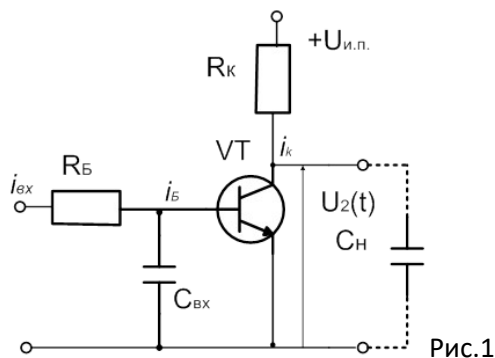
Тема 3.3. Электронные импульсные устройства.

Практическая работа по теме «Ключевой режим работы транзистора».

Цель работы: расширить и систематизировать знания о режимах работы транзистора.

Теоретическая часть:

Чаще всего используются ключи, собранные по схеме с общим эмиттером, как показано на рис.1. В ключевом режиме биполярный транзистор работает в режиме насыщения (замкнутый ключ) или режиме отсечки (разомкнутый ключ). Полезно помнить, что в режиме насыщения оба перехода (коллектор-база и эмиттер-база) открыты, а в режиме отсечки - заперты. В режиме насыщения выходную цепь транзистора можно представить эквивалентным источником напряжения, величина ЭДС которого приводится в справочниках ($K_{ЭНАС}$, U - напряжение насыщения). Строго говоря, следует учитывать также внутреннее сопротивление этого источника, величина которого определяется крутизной наклона линии граничного режима, однако, в большинстве практически важных случаев для инженерных расчетов можно ограничиться величиной - $U_{КЭНАС}$. Резисторы $R_б$ и $R_к$ должны обеспечивать надежное запираание транзистора при низком уровне управляющего сигнала во всем диапазоне рабочих температур и насыщение при высоком уровне управляющего сигнала.



Существуют схемотехнические методы повышения быстродействия ключа: форсирующая цепочка (рис.2, а) и нелинейная обратная связь (рис.2, б).

При расчете необходимо учитывать обратный ток коллектора, протекающий через резистор $R_б$, и создающий на нем падение напряжения. Суммарное напряжение на эмиттерном переходе определяется выражением: $U_{БЭ} = U_0 + I_{Кмакс} \cdot R_б$, где $I_{Кмакс}$ - максимальный ток обратный коллектора, U_0 - напряжение низкого уровня управляющего сигнала. Очевидно, для надежного запираания транзистора необходимо, чтобы $U_{БЭ} < U_{БЭотс}$. Необходимо учитывать сильную температурную зависимость обратного тока коллектора, и для расчета выбирать максимальное значение. В противном случае ключ может «подтекать» при изменении температуры. Открытый транзистор может находиться в активном режиме или режиме насыщения. Для электронных ключей активный режим является невыгодным, так как в этом режиме на коллекторе рассеивается значительная мощность. Поэтому активный режим допустим только в течение переходных процессов (где он, собственно говоря, неизбежен). Для обеспечения насыщения необходимо, чтобы выполнялось соотношение $I_б > I_{б.н.}$. Ток базы можно определить по формуле:

$$I_б = (U_1 - U_{БЭотс}) / (r_б + R_б)$$

Ток насыщения определяется сопротивлением резистора в цепи коллектора, усилительными свойствами транзистора и сопротивлением между коллектором и эмиттером в насыщенном состоянии:

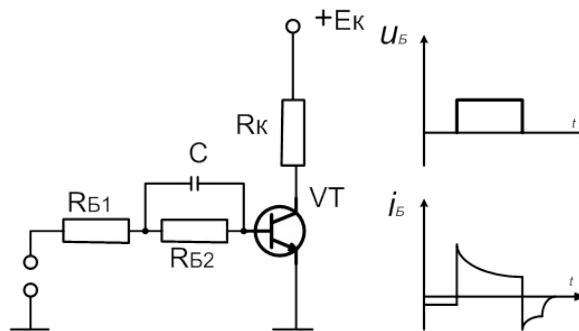
$$I_{\text{Бнас}} = \frac{E - U_{\text{КЭнас}}}{\beta R_{\text{К}}}.$$

При расчетах целесообразно пользоваться наихудшим значением $\beta = \beta_{\min}$. Отметим, что при нарушении условия насыщения транзистор переходит в активный режим, что сопровождается ростом напряжения на коллекторе и увеличением мощности рассеяния. В ряде случаев используют иной критерий насыщения - прямое смещение обоих переходов транзистора (база-эмиттер и база-коллектор). В активном режиме переход база-коллектор смещен в обратном направлении. Необходимой частью проектирования электронных ключей является оценка их динамических свойств, определяющих скорость переключения и потери энергии на этом этапе (динамические потери). Переходные процессы в электронном ключе на биполярном транзисторе характеризуются длительностью цикла переключения, который можно разделить на несколько отдельных этапов:

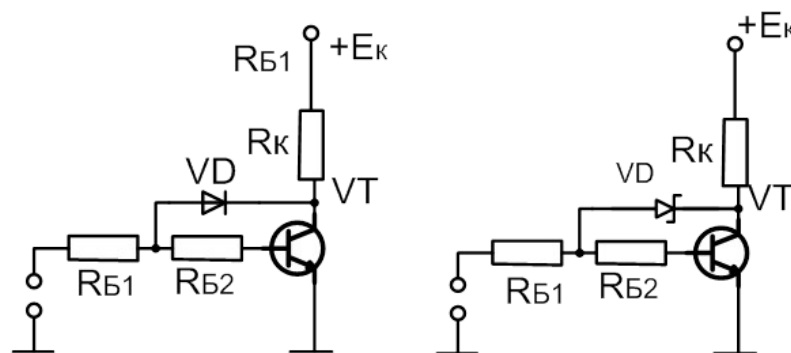
- задержка включения;
- включение (нарастание тока до величины, соответствующей насыщению);
- задержка выключения (обусловлена рассасыванием заряда в базе при переходе из режима насыщения в активный режим);
- выключение (обусловлено уменьшением тока коллектора до значения, соответствующего отсечке).

Необходимо также учитывать процессы заряда емкостей монтажа и нагрузки, которые не имеют прямого отношения к транзистору, но могут существенно влиять на длительность переходного процесса в целом.

Существуют схемотехнические методы повышения быстродействия ключа: форсирующая цепочка (рис.2, а) и нелинейная обратная связь (рис.2, б).



а) Ключ с форсирующей цепочкой



б) Ключ с нелинейной обратной связью

Рис.2. Схемотехнические приемы повышения быстродействия

Принцип работы форсирующей цепочки очевиден: при отпирании транзистора ток базы определяется процессом заряда форсирующей емкости (быстрый переход в режим насыщения), в открытом состоянии ток базы определяется резистором, величина которого выбирается таким образом, чтобы обеспечить неглубокое насыщение транзистора. Таким образом, уменьшается время рассасывания неосновных носителей в базе.

При использовании нелинейной обратной связи применяется диод, включенный между базой и коллектором транзистора. Запертый диод не влияет на работу схемы, когда ключ открывается, диод оказывается смещенным в прямом направлении, а транзистор охваченным глубокой отрицательной обратной связью. Для уменьшения времени выключения необходимо обеспечить малое время восстановления обратного сопротивления диода, для чего применяются диоды с барьером Шотки. Монолитная структура диод Шотки - биполярный транзистор называется транзистором Шотки.

Ключи на биполярных транзисторах имеют ряд недостатков, ограничивающих их применение:

- Ограниченное быстродействие, вызванное конечной скоростью рассасывания неосновных носителей в базе;
- Значительная мощность, потребляемая цепями управления в статическом режиме;
- При параллельном включении биполярных транзисторов необходимо применение выравнивающих резисторов в цепях эмиттеров, что приводит к снижению КПД схемы;
- Термическая неустойчивость, определяемая ростом тока коллектора при увеличении температуры транзистора.

Аналоговые ключи. Ключи на полевых МДП - транзисторах

В настоящее время происходит активное вытеснение биполярных транзисторов из области ключевых устройств. В значительной мере альтернативой служат полевые транзисторы. Полевые транзисторы не потребляют статической мощности по цепи управления, в них отсутствуют неосновные носители, а, значит, не требуется время на их рассасывание, наконец, рост температуры приводит к уменьшению тока стока, что обеспечивает повышенную термостойкость.

Очень часто полевые транзисторы, главным образом МДП-транзисторы, применяются в качестве аналоговых ключей. В силу своих свойств, таких, как малое сопротивление в проводящем состоянии, крайне высокое сопротивление в состоянии отсечки, малые токи утечки и малая емкость, они являются идеальными ключами, управляемыми напряжением, для аналоговых сигналов. Идеальный аналоговый ключ ведет себя как механический выключатель: пропускает сигнал к нагрузке без ослаблений или нелинейных искажений

Из всего многообразия полевых транзисторов для построения электронных ключей наибольшее распространение получили МДП - транзисторы с индуцированным каналом (в иностранной литературе - обогащенного типа). Транзисторы этого типа характеризуются пороговым напряжением, при котором возникает проводимость канала. В области малых напряжений между стоком и истоком (открытый транзистор) можно представить эквивалентным сопротивлением (в отличие от насыщенного биполярного транзистора - источника напряжения). Справочные данные на ключевые транзисторы этого типа включают па-

раметр $R_{сиж\text{отф}}$ - сопротивление сток-исток в открытом состоянии. Для низковольтных транзисторов величина этого сопротивления составляет десятые - сотые доли Ом, что обуславливает малую мощность, рассеиваемую на транзисторе в статическом режиме. К

сожалению, $R_{смот}$ заметно увеличивается при увеличении максимально допустимого напряжения сток-исток.

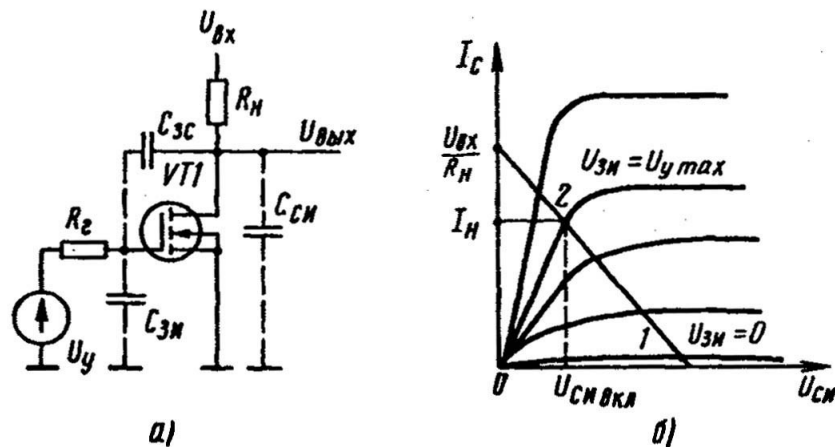


Рисунок 7 - Ключ на МДП транзисторе с индуцированным затвором

Необходимо учитывать, что режим насыщения для МДП-транзистора принципиально отличается от режима насыщения биполярного транзистора. Переходные процессы в ключах на полевых транзисторах обусловлены переносом носителей через канал и перезарядом междуэлектродных емкостей, емкостей нагрузки и монтажа. Так как электроны обладают более высоким быстродействием, чем дырки, то n-канальные транзисторы обладают лучшим быстродействием по сравнению с p-канальными.

Но ключевые МДП транзисторы характеризуются максимально допустимой скоростью изменения напряжения сток-исток. При превышении указанной величины **возможно спонтанное отпирание транзистора с непредсказуемыми результатами.**

Для исключения этого эффекта следует точно соблюдать рекомендации изготовителя и стремиться к тому, чтобы источник управляющего сигнала в цепи затвора имел минимальное внутреннее сопротивление.

Цифровые ключи на IGBT транзисторах

Преимущества, обеспечиваемые работой активных элементов в ключевом режиме, прежде всего экономичность, привели к широкому распространению мощных ключевых устройств. Широко известны импульсные источники питания, ключевые стабилизаторы и регуляторы, генераторы, работающие в ключевом режиме, а также широкий спектр устройств, использующих различные виды импульсной модуляции: ШИМ, АИМ и т.д. При проектировании таких устройств необходимо учитывать некоторые специфические особенности их работы.

Уровень современного развития отечественной и зарубежной элементной базы ставит перед разработчиком вопрос выбора подходящего активного элемента. Современный инженер может выбирать из трех основных видов транзисторов: биполярные, полевые и так называемые IGBT - транзисторы (Insulated Gate Bipolar Transistor), представляющие собой комбинацию двух предыдущих типов: по входу такой транзистор ведет себя как полевой, а по выходу - как биполярный. В отечественной литературе эти приборы именуются биполярными транзисторами с изолированным затвором (БТИЗ). Типичные представители этого семейства могут коммутировать токи в десятки ампер при напряжениях порядка киловольт. Биполярные транзисторы работают при напряжениях до 1.5 кВ и коммутируют токи в несколько десятков ампер, полевые транзисторы работают при более низких значениях напряжения (обычно менее 1000В) и коммутируют токи до сотни ампер.

В настоящее время наметилась вполне определенная тенденция к отказу от чисто аналоговых схем и переходу к цифровым с широким применением микропроцессорной техники.

Цифровая обработка сигналов дает широкие преимущества в смысле гибкости решений, технологичности конструкций, экономии энергопотребления. В схемотехническом плане в основе цифровой техники, а также значительного количества так называемых импульсных устройств лежат электронные ключи.

В качестве нелинейных приборов с управляемым сопротивлением в электронных ключах используются полупроводниковые диоды, биполярные и полевые транзисторы, фототранзисторы, тиристоры, оптроны, электронные лампы.

Ход работы:

1. Изучить теоретическую часть. Выполнить конспект и ответить на вопросы.

Контрольные вопросы

8. Что такое электронный ключ?
9. Состояние транзистора в ключевом режиме.

Практическая работа № 20.

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.

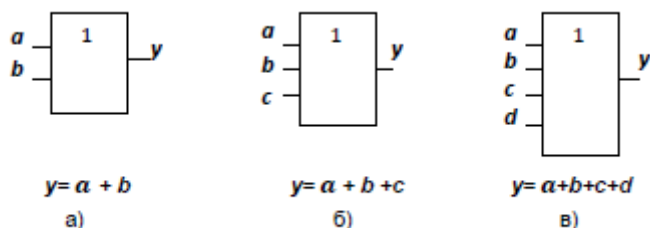


Рис.1.1. Логические элементы **ИЛИ**: а - **2ИЛИ**; б - **3ИЛИ**; в - **4ИЛИ**

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.

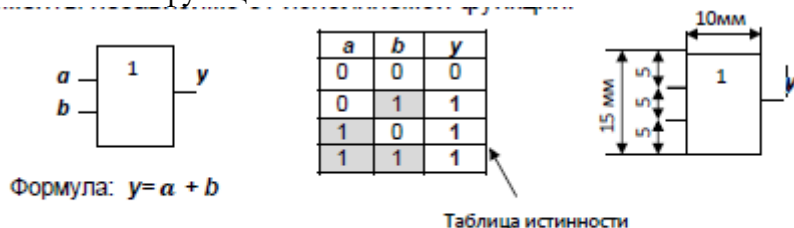


Рис.1.2. Логический элемент **ИЛИ**, его таблица истинности и размеры двухвходового ЛЭ на схемах

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.

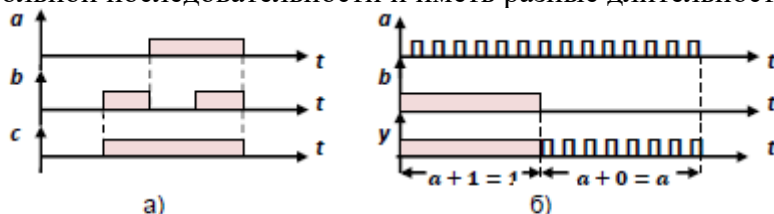


Рис.1.3. Временные диаграммы работы логического элемента **2ИЛИ**: а - сигналы на входы приходят в том порядке, как записаны в таблице истинности; б - сигналы со входа a проходят на выход y при $b=0$

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 .

Иногда логическую функцию двух аргументов можно реализовать на логических элементах с большим количеством входов. Для этого на свободные (лишние) входы принуди-

тельно подают такие логические уровни напряжений, которые не изменяют 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).

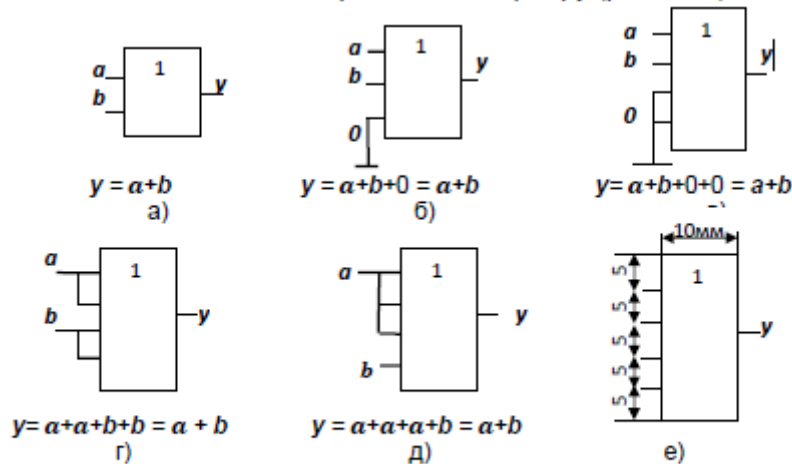


Рис.1.4. Реализация логического сложения двух логических напряжений на элементах 2ИЛИ, 3ИЛИ и 4ИЛИ

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:

$$a \cdot 0 = 0$$

$$a \cdot 1 = a$$

$$a \cdot a = a$$

$$a \cdot \bar{a} = 0.$$

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 0x0 – 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 четырех-входовой (2И,3И,4И) - и формулы, которые они реализуют.

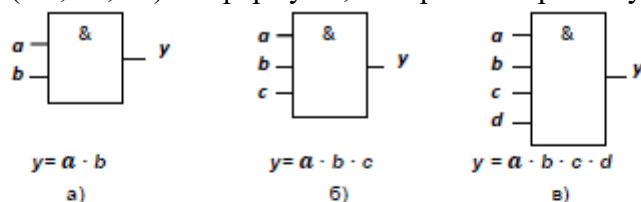


Рис.1.5. Логические элементы **И**: а - 2И; б - 3И; в - 4И

Рассмотрим работу двухвходового элемента **И**. Условное обозначение, формула и таблица истинности представлены на рис.1.6.



Формула: $y = a \cdot b$

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.

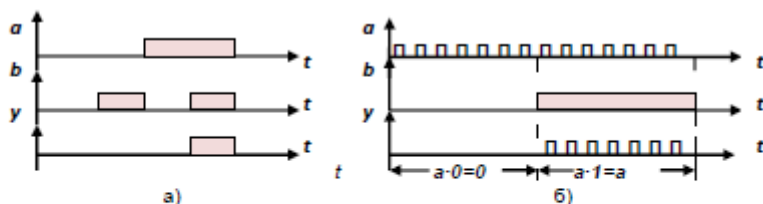


Рис.1.7. Временные диаграммы работы логического элемента 2И: а - сигналы на входы приходят в том порядке, как записаны в таблице истинности; б - сигналы со входа **a** проходят на выход **y** при **b**=1

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** · **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.

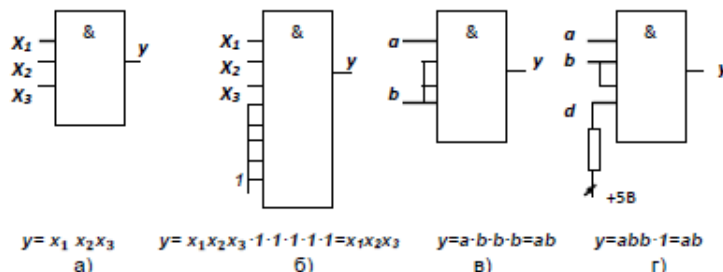


Рис.1.8. Реализация логического умножения на многовходовых ЛЭ: а - функция трех аргументов на элементе **3И**; б - функция трех аргументов на элементе **8И**; в - функция двух аргументов на элементе **4И**; г - функция двух аргументов на элементе **4И**

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.

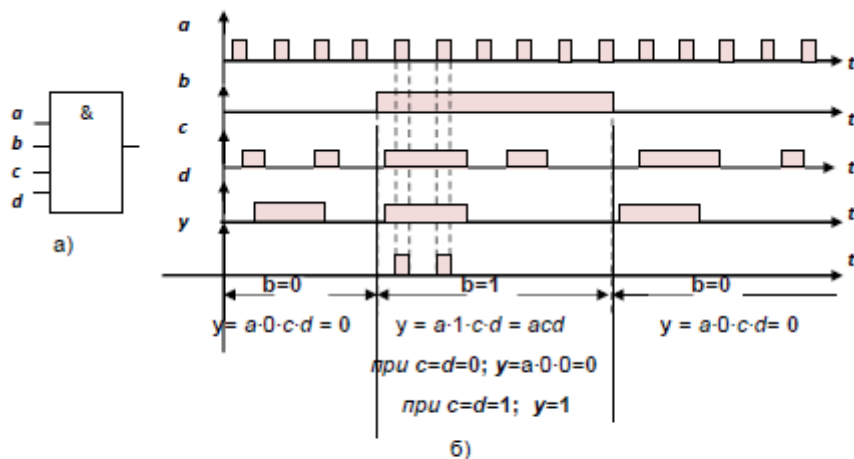


Рис.1.9. Работа логического элемента **4И**: а - условное обозначение; б - временная диаграмма работы ЛЭ при заданных изменениях напряжений на входах $a(t)$, $b(t)$, $c(t)$, $d(t)$

² Здесь и далее в пособии, будем считать подачей логической единицы – соединение соответствующего входа с источником питания +5В (рис.1.8в).

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

Правило алгебры логики:

если в умножении участвует хотя бы один **0**, то результат равен **0**.

Работа логического элемента И:

если хотя бы на один 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:

$$\bar{0}=1$$

$$\bar{1}=0.$$

Другие названия ЛЭ «инверсия» – элемент **НЕ**, инвертор. Этот логический элемент просто меняет входной сигнал на его противоположность (рис.1.10). И все!

Из формулы $y = \bar{a}$ видно, что значение y - противоположно значению a , это подтверждает и график.

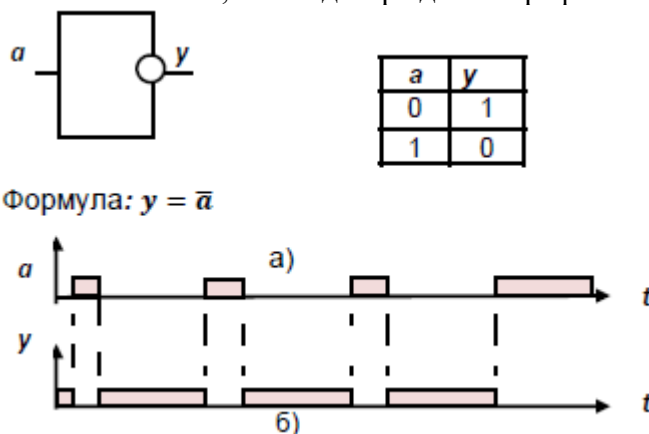


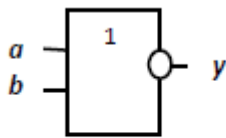
Рис. 1.10. Логический элемент **НЕ**: а – условное обозначение и таблица истинности; б – временная диаграмма

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.



a	b	y
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

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).

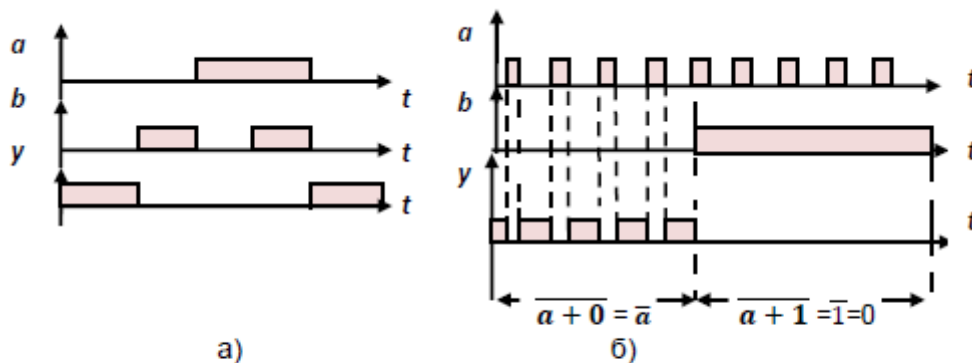


Рис.1.12. Временные диаграммы работы элемента **ИЛИ-НЕ**: а - сигналы на входы приходят в том порядке, как записаны в таблице истинности; б - при $b=0$ сигналы со входа a проходят в инверсном виде на выход y

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 $b=1$ $y = \overline{a + 1} = \bar{1} = 0$ – 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 **ИЛИ-НЕ**, если входные напряжения $a(t)$ $b(t)$ $c(t)$ $d(t)$ заданы графиками (рис.1.13).

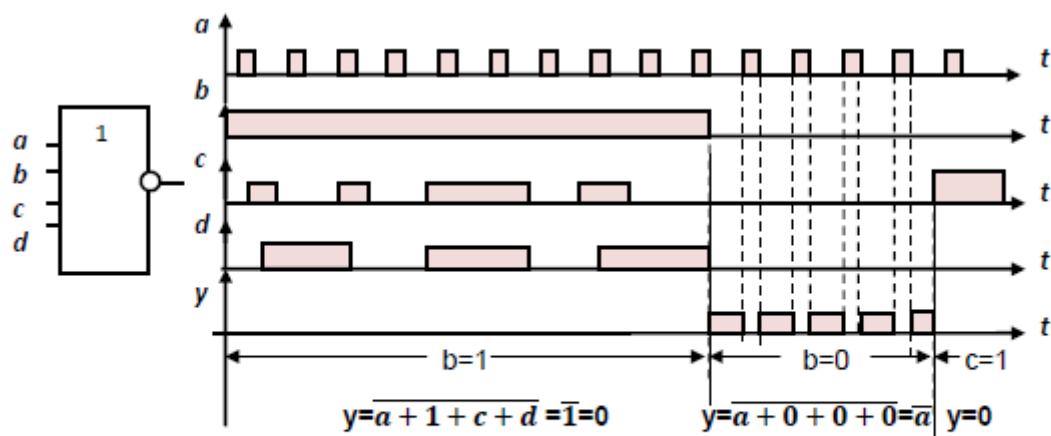


Рис.1.13. Условное обозначение элемента **4ИЛИ-НЕ** и временная диаграмма его работы при заданных значениях $a(t), b(t), c(t), d(t)$

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**.

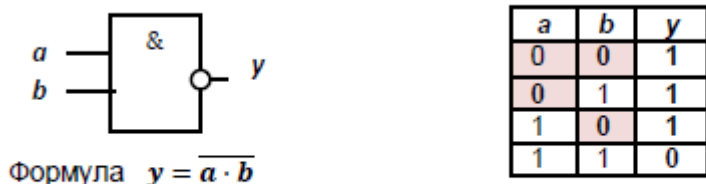
Работа логического элемента 2ИЛИ-НЕ:

- 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 $y = \overline{a \cdot b}$

Рис. 1.14. Логический элемент **И-НЕ** и его таблица истинности

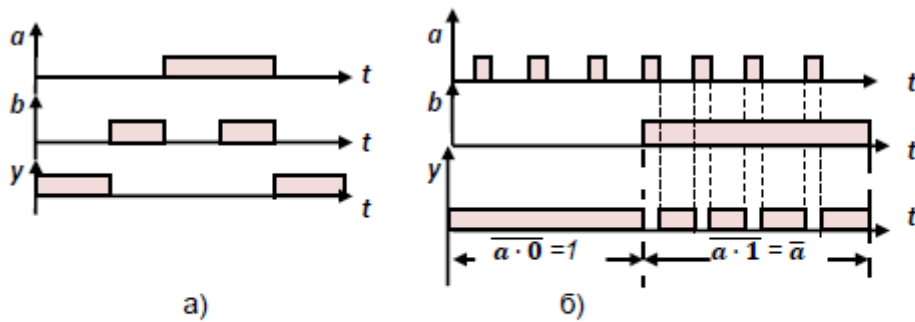


Рис. 1.15. Временные диаграммы работы элемента **2И-НЕ**: а - сигналы на входы приходят в том порядке, как записаны в таблице истинности; б - при $b=1$ сигналы со входа a проходят в инверсном виде на выход y

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 поддерживается 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**. Условное обозначения, таблица истинности и временная диаграмма работы двух-входового ЛЭ «сумма по модулю 2» представлены на рис. 1.16.

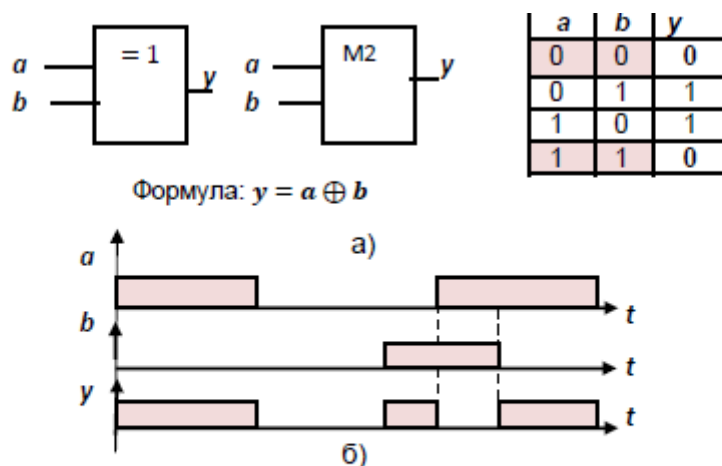


Рис. 1.16. Логический элемент сумма по модулю 2: а – условные обозначения и таблица истинности; б – временная диаграмма работы

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 $a=1$, $y=\bar{b}$

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.

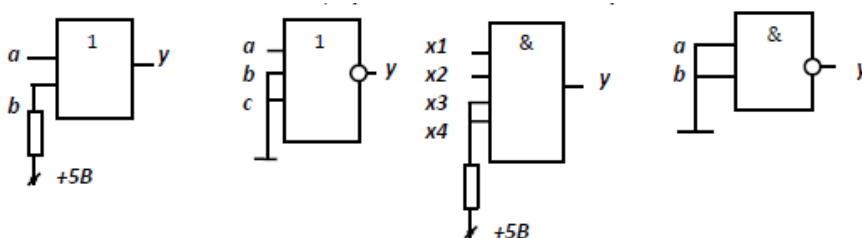


Рис.1.17. Примеры включения логических элементов

1.7. Построение схем на ЛЭ по формулам

Построим схему на логических элементах по заданной формуле $y=ab+c$ (рис. 1.18).

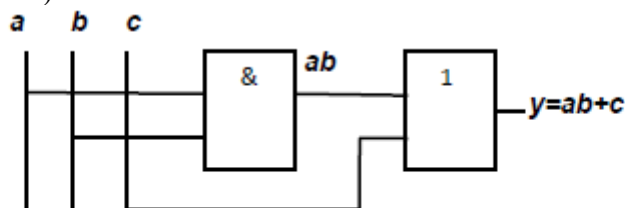


Рис. 1.18. Построение схемы на логических элементах по формуле $y=ab+c$

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 $y = a\bar{b}\bar{c} + (ac+b)$.

Построение схемы ведется последовательно.

а) так как в формулу входят аргументы как в прямом виде a, b, c , так и в инверсном $\bar{a}$ и $\bar{b}$, то получим сначала инверсии входных сигналов $\bar{a}$ и $\bar{b}$ (рис.1.19);

б) выполним произведение с инверсией $a\bar{b}\bar{c}$ логическим элементом **3И-НЕ**;

в) реализуем $\bar{a}c$ логическим элементом **2И-НЕ**.

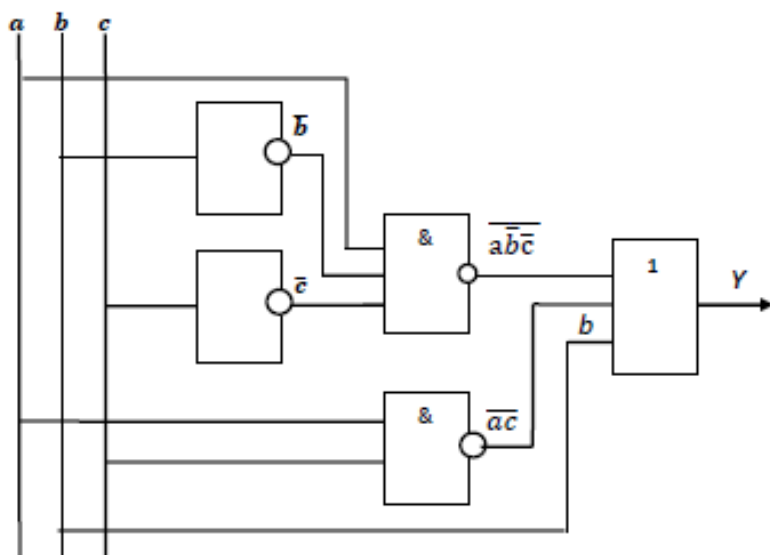


Рис.1.19. Реализация функции $y = a\bar{b}\bar{c} + (\bar{a}c + b)$.

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 **3ИЛИ**, ведь скобки, использованные в записи выражения y , не меняют результата сложения.

На рис.1.19 использован второй вариант с использованием ЛЭ **3ИЛИ**.

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
 $y = (a + \bar{b} + c + d) \overline{ab} + cd^3$

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 $\overline{ab}$;
- ✓ произведение двух логических сомножителей $(a + \bar{b} + c + d) \overline{ab}$;
- ✓ произведение cd ;
- ✓ и сумма двух слагаемых $(a + \bar{b} + c + d) \overline{ab} + cd$
 – и все это на 3-входовых ЛЭ!

Вариантов не 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 отрабатываются 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 $\bar{b}$ можно выполнить на любом 3-входовом ЛЭ синверсией. Выбираем элемент **ИЛИ-НЕ**.

На входы остальных логических элементов подадим принудительно 0 и 1 в соответствии с выполняемой логической функцией (см. рис.1.20).

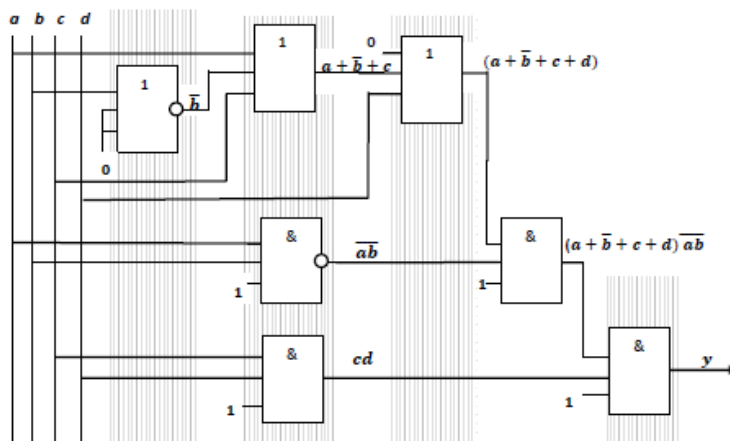


Рис.1.20. Реализация функции y в соответствии с условием задачи 3

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.

Задача 4. Построить схему, реализующую функцию

$$y = a \square \square \square b \square \square c \square \square c \square \square \square a \square \square \square \square \square \square b \square \square \square \square$$

только на элементах **И-НЕ** и **ИЛИ-НЕ**.

Задача 4. Построить схему, реализующую функцию

$$y = \overline{abc} + c(\overline{a} + \overline{b})$$

только на элементах **И-НЕ** и **ИЛИ-НЕ**.

Решение.

Не трудно заметить, что для простой реализации схемы нужно иметь логические элементы и с инверсией и без нее:

- ✓ И-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-входовым элементом **ИЛИ-НЕ** (можно элементом **И-НЕ**); $\overline{b}$ - аналогично.
- 2) $(\overline{a} + \overline{b})$: на элементе **ИЛИ-НЕ** сначала получим выражение $\overline{(\overline{a} + \overline{b})}$, а затем проинвертируем его на 2-входовом **И-НЕ**, и получим $\overline{\overline{(\overline{a} + \overline{b})}} = \overline{a} + \overline{b}$ (помните: двойная инверсия числа равна самому числу $\overline{\overline{X}}=X$);
- 3) $c(\overline{a} + \overline{b})$: получим на элементе **И-НЕ**;

Выражение для y обычно упрощают перед построением, однако в данном разделе по-прежнему 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.

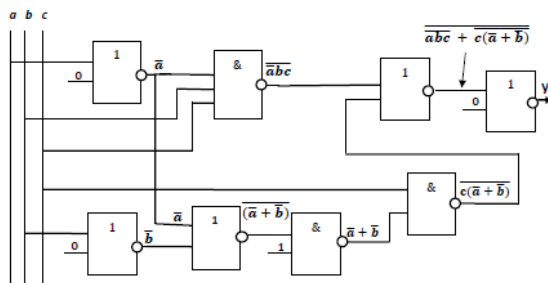


Рис. 1.21. Реализация функции y в соответствии с условием задачи 4

Ход работы:

1. Изучить теоретическую часть и решить задачи по каждой теме.

Контрольные вопросы

Практическая работа № 21.

Тема 3. 4. Электронные цифровые устройства

Практическая работа по теме «Цифровые логические автоматы без памяти: коммутаторы, сумматоры».

Цель работы: расширить и систематизировать знания о.

Теоретическая часть:

ЦИФРОВЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ АВТОМАТЫ БЕЗ ПАМЯТИ

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.

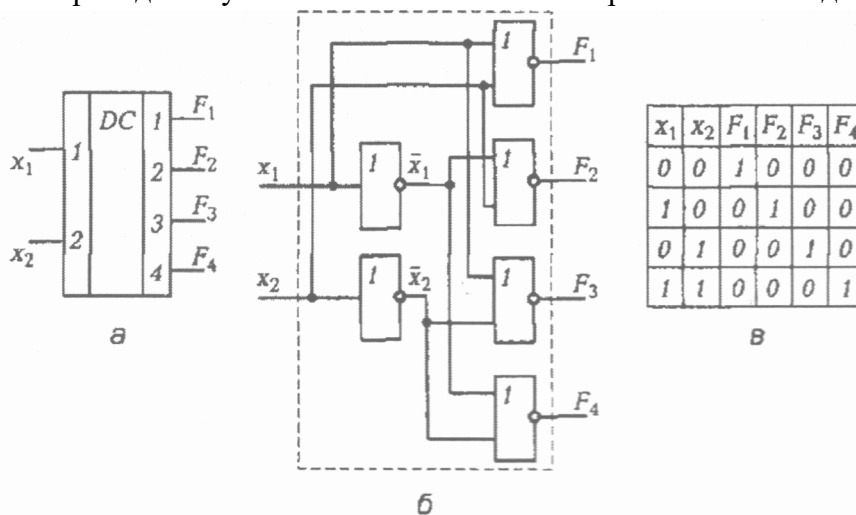


Рис. 17.1

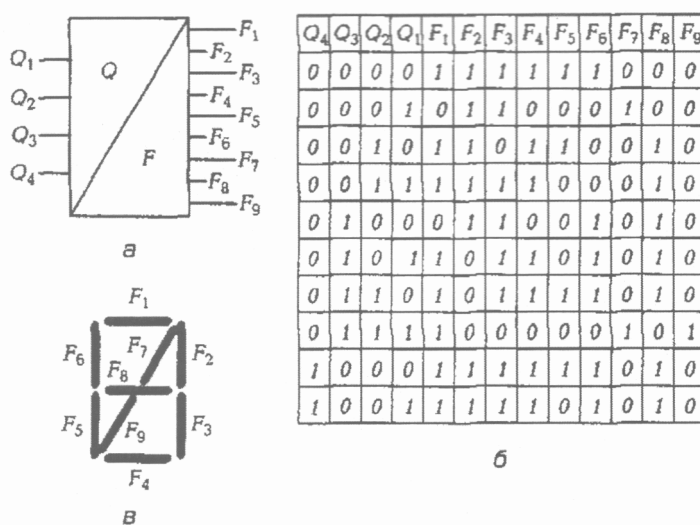


Рис. 17.2

на $n = 2$ входа и $2^n = 4$ 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 $0_1 0_2 0_3 0_4$ (цифры в индексах указывают номера разрядов) в сигналы управления $F_1 \dots F_9$ девятью сегментами светового индикатора (рис. 17.2, в).

Шифратор выполняет функцию, обратную дешифратору. Он имеет 2^n 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 чис-

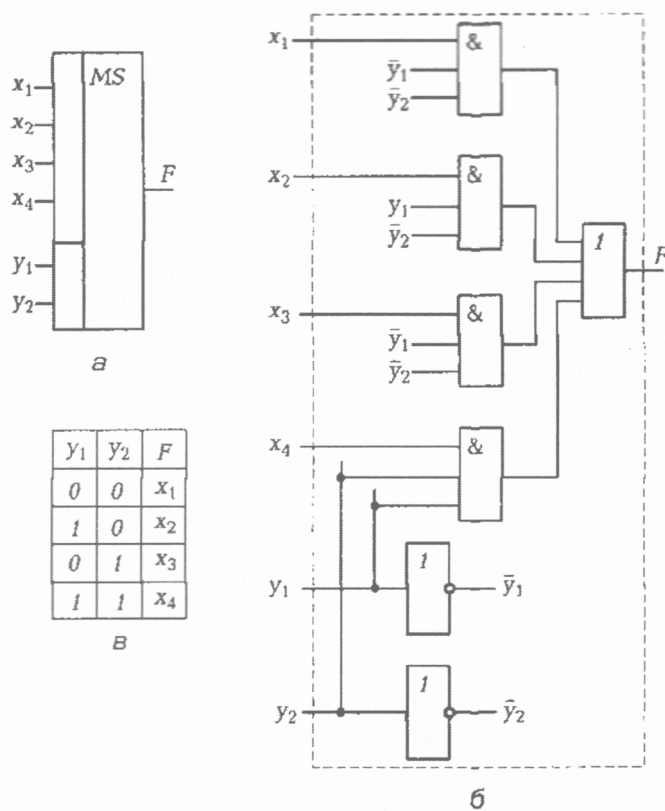


Рис. 17.3

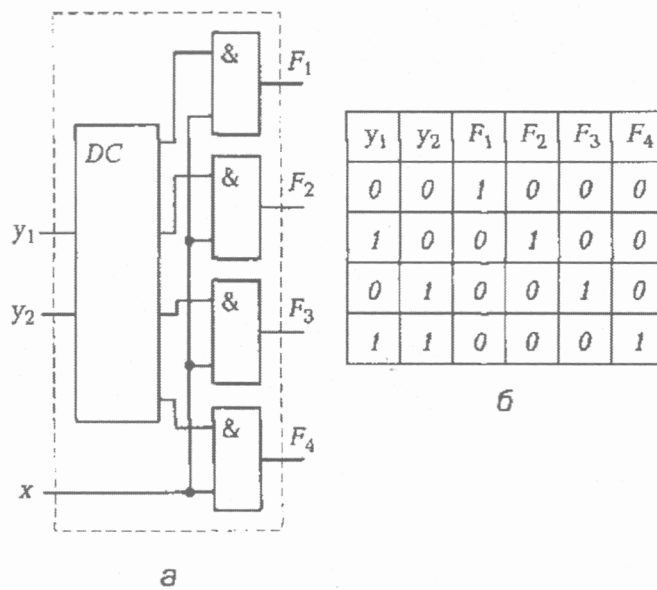


Рис. 17.4

ла 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.

Пример схемной реализации демультимплексора 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 учтены таблица истинности дешифратора {см. рис. 17.1, в), приведены на рис. 17.4, а и б.

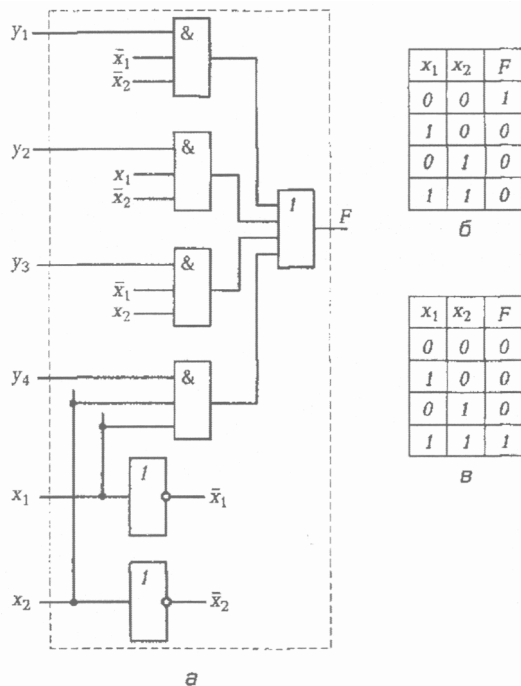


Рис. 17.5

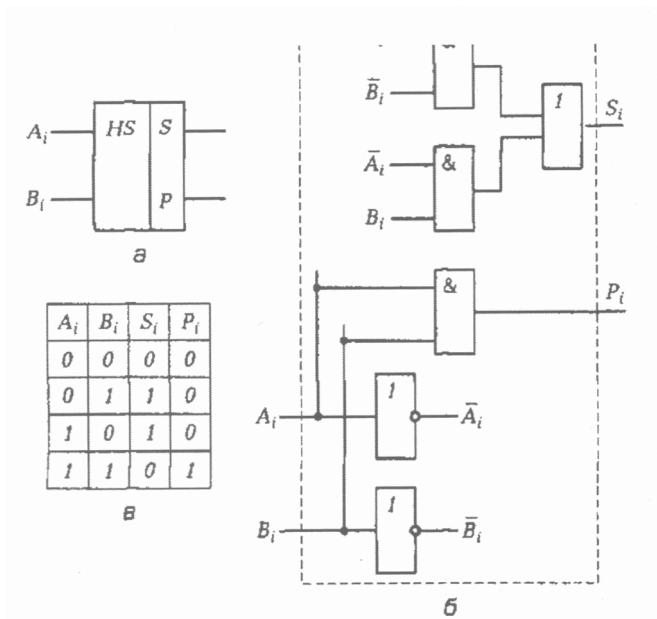


Рис. 17.6

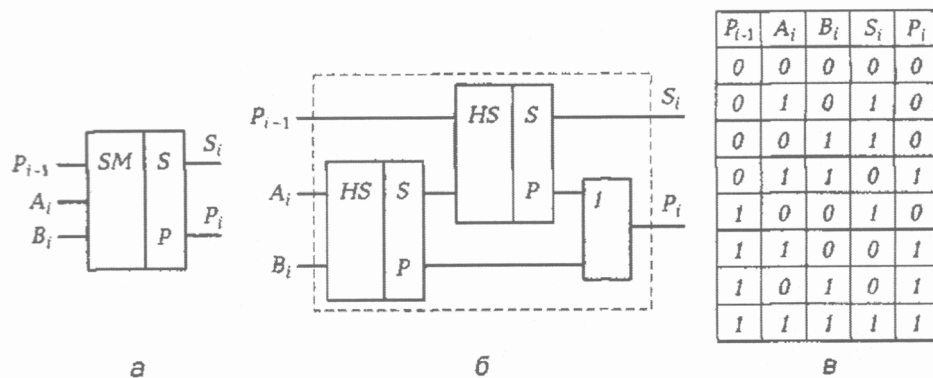


Рис. 17.7

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 и 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

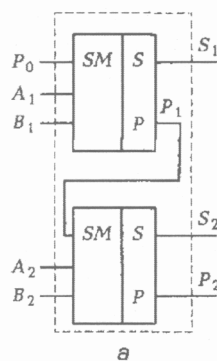


Рис. 17.8

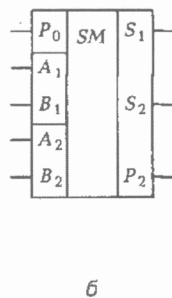


Рис. 17.9

входах x_1 и x_2 . Например, логическим функциям $F = x_1 + x_2$ 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 состоит из одноразрядных **полусумматоров**. Последние не учитывают перенос из младшего разряда.

На рис. 17.6, **а** — введены условные обозначения интегральной схемы одноразрядного полусумматора, его функциональная схема и таблица истинности, где A, B — одноименные разряды двух двоичных чисел; S , — сумма; P , — перенос в старший разряд.

Условные обозначения интегральной схемы одноразрядного сумматора, его функциональная схема и таблица истинности приведены на рис. 17.7, **а—в**. Из одноразрядных составляются многоразрядные сумматоры. Схема и условные обозначения 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_i и B_i равна $S_i = 1$ и перенос в старший разряд $P_i = 0$.

Таким образом, при равенстве двух двоичных чисел на выходе сумматора $S_n = S_2 = 1$ 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. Изучить теоретическую часть и ответить на вопросы.

Практическая работа № 22.

Тема 3. 4. Электронные цифровые устройства

Практическая работа по теме «Цифровые логические автоматы с памятью и адресной выборкой: регистры, счетчики. Запоминающие устройства».

Цель работы: расширить и систематизировать знания по теме «Цифровые логические автоматы с памятью и адресной выборкой: регистры, счетчики».

Теоретическая часть:

ЦИФРОВЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ АВТОМАТЫ С ПАМЯТЬЮ

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 предыдущей 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 (см. рис. 16.21, а) 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 $Q_i = 0$, $i = 0, 1, 2$. В момент окончания первого счетного импульса триггер младшего разряда ГГ, переключается, а состояние триггеров старших разрядов ГГ₂ и ГГ₃ не изменяется, т.е. значение двоичного числа на выходе счетчика равно $0,0,0$, $= 001$. В момент окончания второго счетного импульса триггер ГГ, снова переключается и логическое значение выхода младшего разряда изменяется с 1 на 0. Поэтому одновременно переключится и триггер ГГ₂, 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

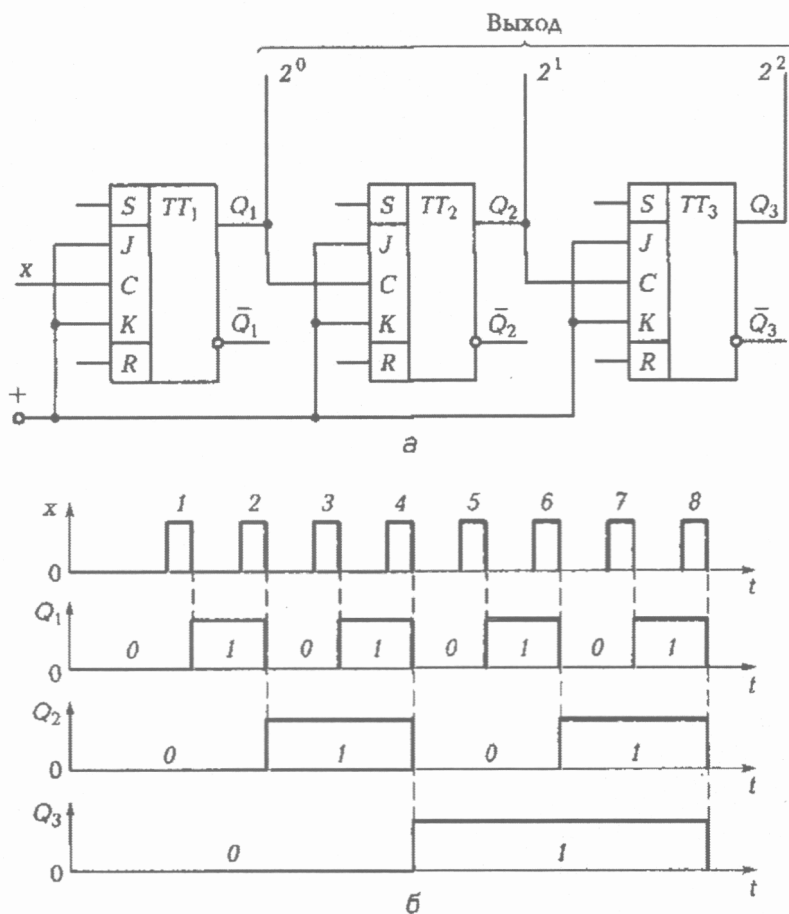


Рис. 17.10

его выходе (рис. 17.10, б). После седьмого счетного импульса число на выходе счетчика $03020] = 111$, 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, D_2, D_4, D_8 — для установки счетчика в заданное состояние; **C** — для разрешения установки счетчика в состояние, заданное на входах $D, \dots, D_6$ (цифры в индексах указывают веса разрядов); **V** — для разрешения счета.

2. **Выходы:** $Q_1 Q_2 Q_3 Q_4$ — 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*.

Сдвигowymi регистрами называются устройства для приема, хранения, передачи и преобразования информации, представленной обычно в двоичной системе счисления.

Элементной базой их реализации являются синхронные и асинхронные триггеры (см. подразд. 16.6). 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 Ж-триггерах. Предварительно подачей сигналов на установочные входы R (см. рис. 16.17, *а*) триггеры устанавливаются в состояние $Q_i = 0$ - $Q_j = 0$.

Подав логический сигнал $x = 1$ на вход регистра, т. е. на установочный вход S триггера $T T_2$, приведем его в состояние $Q_x = 1$ (рис. 17.12, *б*). При этом состояние регистра определится совокупностью значений $QAO^* = 100$. По действием первого импульса синхронизации C состояние регистра изменится на $0,0_20_3 = 010$. По действием второго импульса синхронизации на $0_10_20_3 = 001$ и т. д.

При **параллельном вводе** информации все разряды двоичного числа одновременно подаются каждый на вход соответствующе-

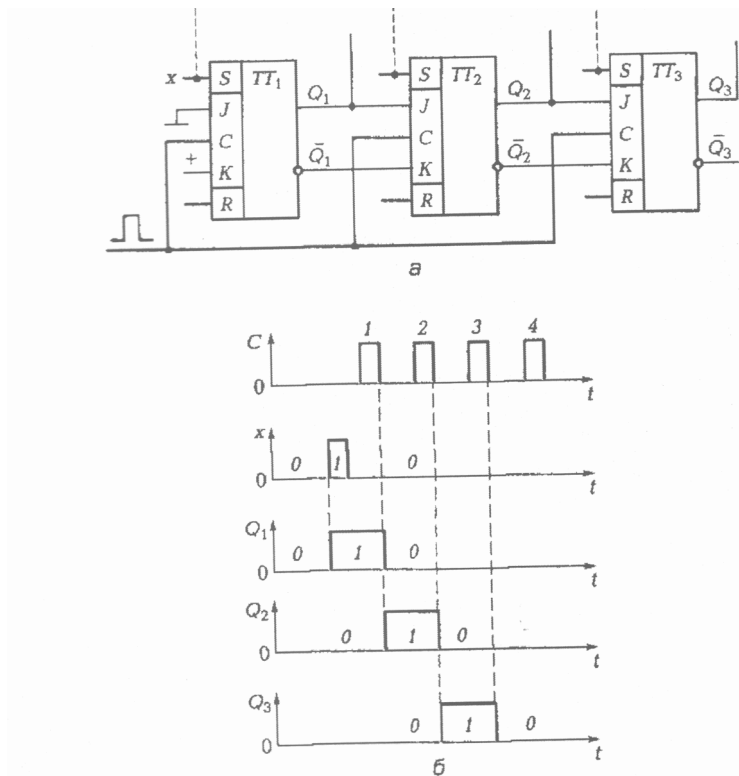


Рис. 17.12

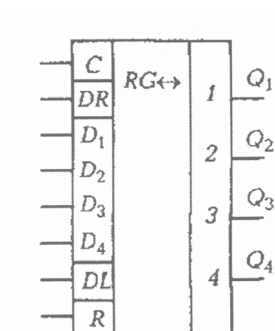


Рис. 17.13

го разряда регистра. Например, как показано на рис. 17.12, *а* штриховыми линиями.

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, V — для разрешения сдвига.

2. **Выходы:** $O_1, O_2, \dots$ — для указания содержимого регистра.

На рис. 17.13 приведено условное обозначение интегральной схемы четырехразрядного универсального сдвигового регистра.

ЦИФРОВЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ АВТОМАТЫ С АДРЕСНОЙ ВЫБОРКОЙ.

ЗАПОМИНАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

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 (см. подразд. 16.6) или электрические емкости р-л- переходов транзисторов с большой постоянной времени разрядки. В последнем случае ОЗУ называется **динамическим**, так как требуется периодическое восстановление его электрического 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.

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.

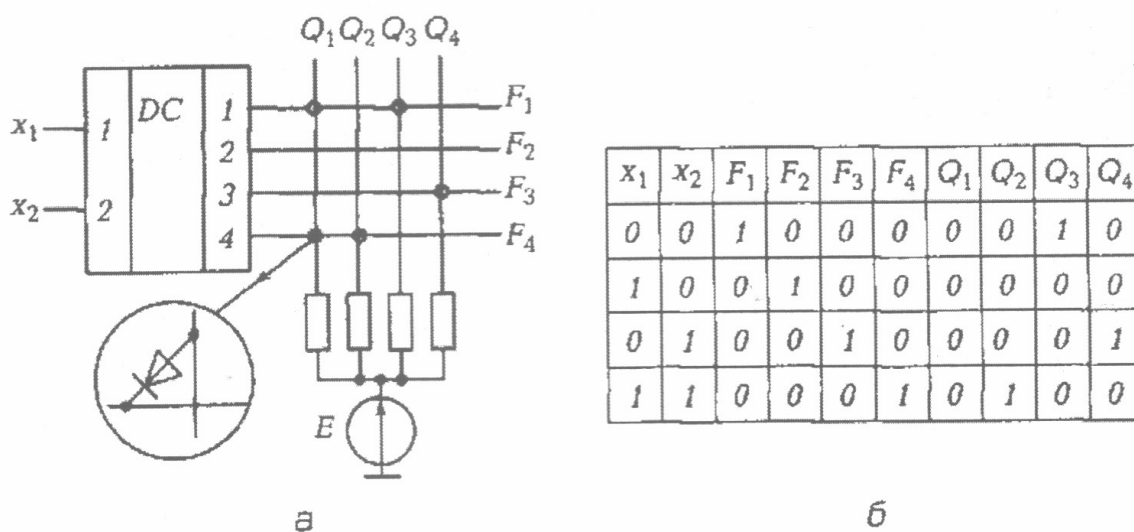
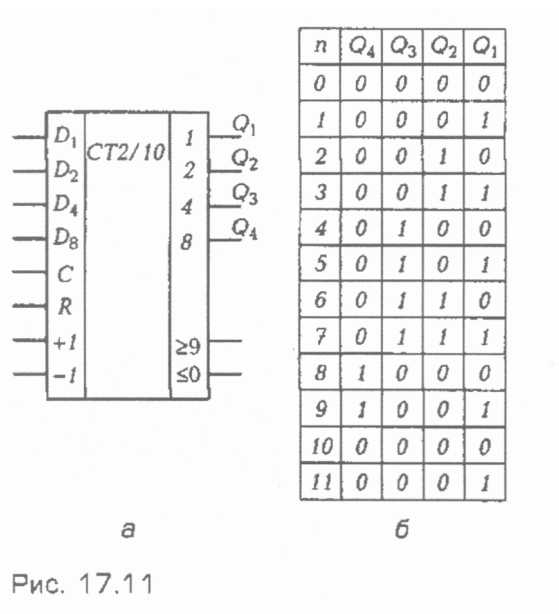


Рис. 17.14



Ход работы:

1. Изучить теоретическую часть и ответить на вопросы.

Контрольные вопросы

Практическая работа № 23.

Тема 4.1. Структурные схемы вторичных источников электропитания

Практическая работа по теме «Силовые преобразователи»

Цель работы: расширить и систематизировать знания о

Теоретическая часть:

Классификация электронных преобразовательных устройств

Преобразовательные электронные устройства осуществляют преобразование напряжения и тока источника энергии в напряжение и ток, необходимые приемнику энергии.

В зависимости от видов напряжений и токов источника и приемника различают:

- *выпрямители* — для преобразования синусоидальных напряжений и токов в постоянные;
- *инверторы* — для преобразования постоянных напряжений и токов в синусоидальные;
- *конверторы* — для преобразования постоянных напряжений и токов в постоянные — других значений.

Комбинирование выпрямителя и инвертора реализует преобразование синусоидальных напряжения и тока одной частоты в синусоидальные напряжения и ток другой частоты.

Преобразователи большой мощности (до сотен и более киловатт) применяются в электроприводе, устройствах электросварки, электротермии и т.п., малой мощности (до нескольких десятков ватт) — в источниках вторичного электропитания (ИВЭП) радиоэлектронной аппаратуры.

Рассмотрим принцип действия и характеристики выпрямителей, которые классифицируют по числу фаз источника выпрямленного синусоидального напряжения — на однофазные и многофазные (чаще трехфазные) выпрямители, по схемотехническому решению — с выводом нулевой точки трансформатора и мостовые, по возможностям регулирования выпрямленного напряжения — на неуправляемые и управляемые.

Неуправляемые однофазные выпрямители

В общем случае структурная схема выпрямительного устройства (рис. 14.1) содержит трансформатор T , выпрямитель B , сглаживающий фильтр Φ и стабилизатор выпрямленного напряжения $Ст$. Трансформатор служит для изменения значения синусоидального напряжения сети C до необходимого уровня, которое затем выпрямляется. Сглаживающий фильтр уменьшает пульсации выпрямленного напряжения. Стабилизатор поддерживает неизменным напряжение на приемнике $П$ при изменении напряжения сети. Отдельные узлы выпрямительного устройства, например трансформатор, могут отсутствовать, что зависит от условий работы.

Далее вместо термина «выпрямительное устройство» будем пользоваться сокращенным — «выпрямитель».

В неуправляемых выпрямителях для выпрямления синусоидального напряжения включаются диоды, т.е. неуправляемые вентили, а для сглаживания выпрямленного напряжения — обычные емкостные фильтры.

Для упрощения расчетов примем, что приемник представляет собой резистивный двухполюсник с сопротивлением нагрузки R_n .

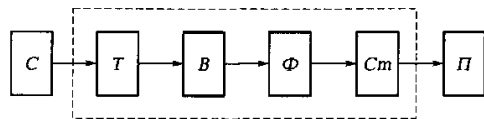


Рис. 14.1

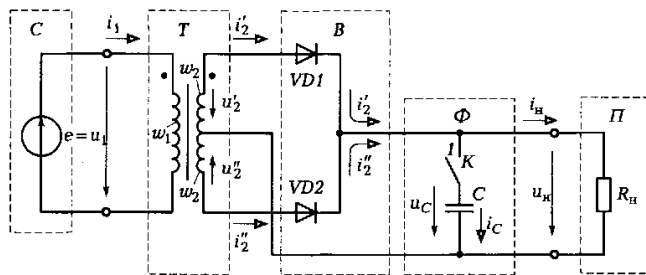


Рис. 14.2

а диоды — идеальные ключи, реализующие короткое замыкание цепи для тока в прямом направлении и ее разрыв для тока в обратном направлении.

В выпрямителе с нулевым выводом трансформатора приемник подключается к выводу от середины вторичной обмотки трансформатора (рис. 14.2). Рассмотрим работу выпрямителя без сглаживающего фильтра (ключ K разомкнут). Если в каждой половине вторичной обмотки с числом витков w_2 считать положительным направление тока, при котором соответствующий диод включен, то ток в каждой половине обмотки и в каждом диоде будет синусоидальным в течение положительного (для этой половины) полупериода и равным нулю в течение отрицательного полупериода (рис. 14.3, а). В приемнике положительные направления обоих токов совпадают, т. е. $i_H = i_2' + i_2''$ (рис. 14.3, б).

Такое выпрямление синусоидального тока называется *двухполупериодным*. Если цепь одной из вторичных обмоток w_2 разомкнуть, то выпрямление синусоидального тока будет *однополупериодным*.

При идеальном трансформаторе постоянная составляющая тока нагрузки

$$I_0 = \frac{2}{\pi} I_{m2} \approx 0,64 I_{m2} \quad (14.1)$$

и его действующее значение

$$I = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{T/2} I_{m2}^2 \sin^2 \omega t dt} = \frac{I_{m2}}{\sqrt{2}} \quad (14.2)$$

равны значениям соответствующих величин синусоидального тока с той же амплитудой.

Ток в первичной обмотке трансформатора с числом витков w_1 синусоидальный

$$i_1 = (i_2' - i_2'') \frac{w_2}{w_1} = I_{m2} \frac{w_2}{w_1} \sin \omega t$$

и совпадает по фазе с синусоидальным напряжением сети (рис. 14.3, в)

$$u_1 = (u_2' - u_2'') \frac{w_1}{2w_2} = U_{m2} \frac{w_1}{w_2} \sin \omega t.$$

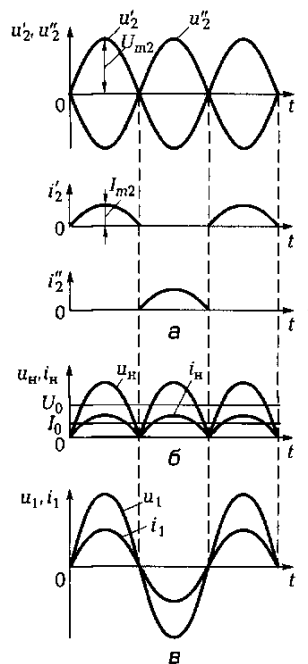


Рис. 14.3

Рассмотрим, как изменится работа выпрямителя после включения сглаживающего фильтра (ключ K замкнут). По первому закону Кирхгофа для узла 1 цепи прямой ток диода $VD1$ равен

$$i'_2 = i_C + i_H,$$

или

$$i'_2 = C \frac{du_C}{dt} + u_H / R_H,$$

где $u_C = u_H = u'_2 = U_{m2} \sin \omega t$ и $i_C = C \frac{du_C}{dt} = \omega C U_{m2} \cos \omega t$ — напряжение на конденсаторе фильтра и ток в нем.

Подставив в это уравнение значение тока $i'_2 = 0$, определим момент времени t_1 выключения диода:

$$\omega C U_{m2} \cos \omega t_1 + \frac{U_{m2}}{R_H} \sin \omega t_1 = 0,$$

откуда

$$t_1 = \frac{\arctg(-\omega R_H C)}{\omega}.$$

Начиная с момента времени t_1 , напряжение на приемнике будет изменяться экспоненциально (см. подразд. 1.5):

$$u_H = u_C = U_{m2} \sin \omega t_1 e^{-\frac{t-t_1}{R_H C}},$$

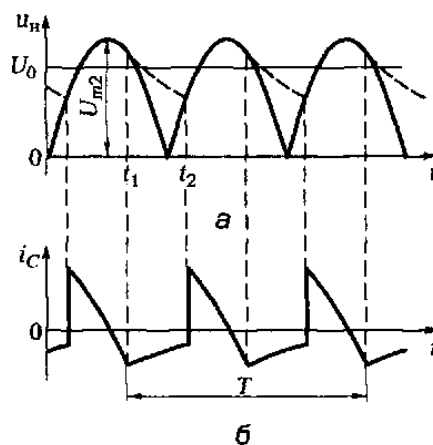


Рис. 14.4

как показано на рис. 14.4, а штриховой линией.

В момент времени t_2 напряжения на конденсаторе u_C и на входе выпрямителя $u_2'' = -U_{m2} \sin \omega t_2$ будут равны и включится диод $VD2$. Далее процесс в цепи будет периодически повторяться. Происходит периодическая зарядка конденсатора фильтра током i_C от источника энергии и его последующая разрядка на цепь приемника (рис. 14.4, б).

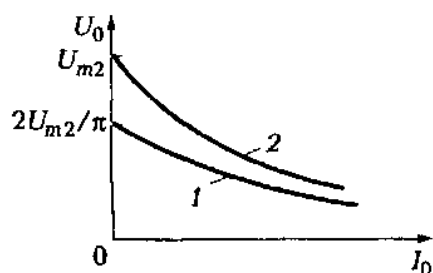


Рис. 14.5

Включение сглаживающего фильтра увеличивает постоянную составляющую U_0 и уменьшает содержание гармонических составляющих выпрямленного напряжения.

Внешней характеристикой выпрямителя называется зависимость среднего значения выпрямленного напряжения U_0 от среднего значения выпрямленного тока I_0 .

На рис. 14.5 приведены внешние характеристики однофазного выпрямителя без сглаживающего фильтра (зависимость 1) и со сглаживающим фильтром (зависимость 2).

В первом случае уменьшение напряжения U_0 при уменьшении сопротивления цепи нагрузки и увеличении выпрямленного тока объясняется увеличением падения напряжения на реальном диоде, а во втором — также более быстрой разрядкой конденсатора.

В мостовой схеме выпрямителя (рис. 14.6) четыре диода образуют четыре плеча выпрямительного моста. Одну половину периода диоды $VD1$ и $VD2$ включены и проводят ток i' , а диоды $VD3$ и $VD4$ выключены. Вторую половину периода диоды $VD3$ и $VD4$ включены и проводят ток i'' , а диоды $VD1$ и $VD2$ выключены (рис. 14.7, а). Для мостовой схемы справедливы все полученные

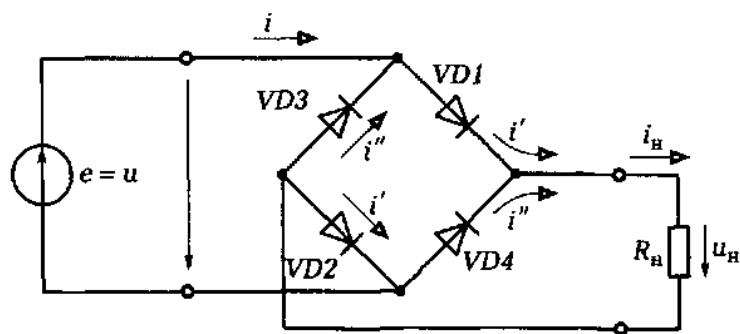


Рис. 14.6

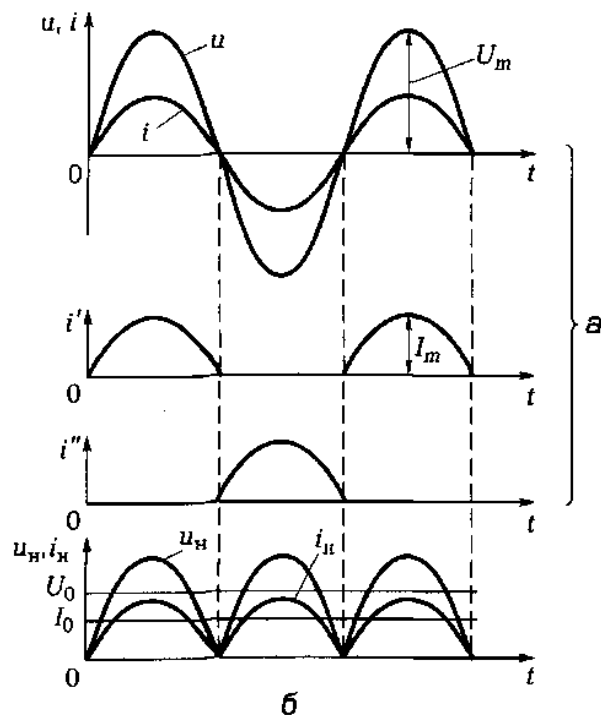


Рис. 14.7

выше соотношения для выпрямителя с нулевым выводом трансформатора. При этом ток нагрузки выпрямленный $i_n = i' + i''$ (рис. 14.7, б), а ток источника $i = i' - i''$ синусоидальный (см. рис. 14.7, а).

14.3. НЕУПРАВЛЯЕМЫЕ МНОГОФАЗНЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Многофазные выпрямители по сравнению с однофазными уменьшают пульсацию выпрямленного напряжения.

На рис. 14.8 показана схема трехфазного выпрямителя с нулевым выводом трехфазного трансформатора (см. рис. 7.13, б). В каждый данный момент времени ток проводит только тот диод анод которого соединен с выводом той вторичной обмотки трансформатора (а, b или c), напряжение на которой (u_a , u_b или u_c) положительное и наибольшее (рис. 14.9, а).

Для идеального трансформатора токи вторичных обмоток i_a , i_b и i_c представляют собой три последовательности импульсов с периодом повторения $T = 2\pi/\omega$, длительностью $T/3$ и амплитудой

$I_{m2} = U_{m2}/R_H$ каждая, сдвинутые относительно друг друга на $\frac{1}{3}$ периода (рис. 14.9, б).

Токи первичных обмоток равны

$$\boxed{i_A = \frac{w_2}{w_1} i_a}, \quad \boxed{i_B = \frac{w_2}{w_1} i_b}, \quad \boxed{i_C = \frac{w_2}{w_1} i_c},$$

ток нагрузки $i_H = i_a + i_b + i_c$ имеет постоянную составляющую I_0 . Выпрямленное напряжение в этом случае совпадает с огибающей положительных полуволн напряжений вторичных обмоток $u_H =$

$R_H i_H$ (рис. 14.9, в). Заметим, что токи во вторичных и первичных обмотках трансформатора имеют постоянные составляющие $I_0/3$ и $w_2 I_0/(3w_1)$, а магнитный поток в его магнитопроводе переменный.

В трехфазной *мостовой* схеме выпрямителя нулевой вывод вторичной обмотки трехфазного трансформатора не нужен. Поэтому его вторичные обмотки могут быть соединены как звездой, так и треугольником, или, если позволяют условия работы, трехфазный трансформатор может вообще отсутствовать. При отсутствии трехфазного трансформатора выпрямитель подключается к трехфазному источнику (рис. 14.10) так, что диоды $VD1$, $VD3$ и $VD5$ образуют группу, в которой соединены все катодные выводы, а диоды $VD2$, $VD4$ и $VD6$ — группу, в которой соединены все анодные выводы.

Примем значение потенциала нейтральной точки N трехфазного источника $v_N = 0$. При этом потенциалы его выводов A , B и C равны (рис. 14.11, а)

$$\begin{aligned} v_A &= u_A = U_m \sin \omega t; \\ v_B &= u_B = U_m \sin (\omega t - 2\pi/3); \\ v_C &= u_C = U_m \sin (\omega t - 4\pi/3). \end{aligned}$$

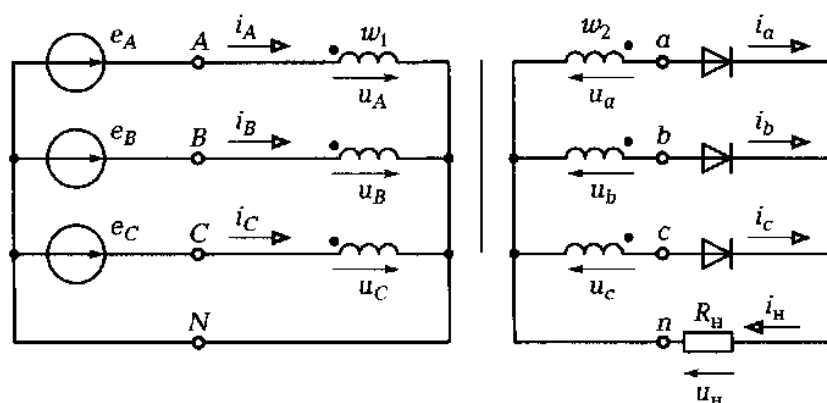


Рис. 14.8

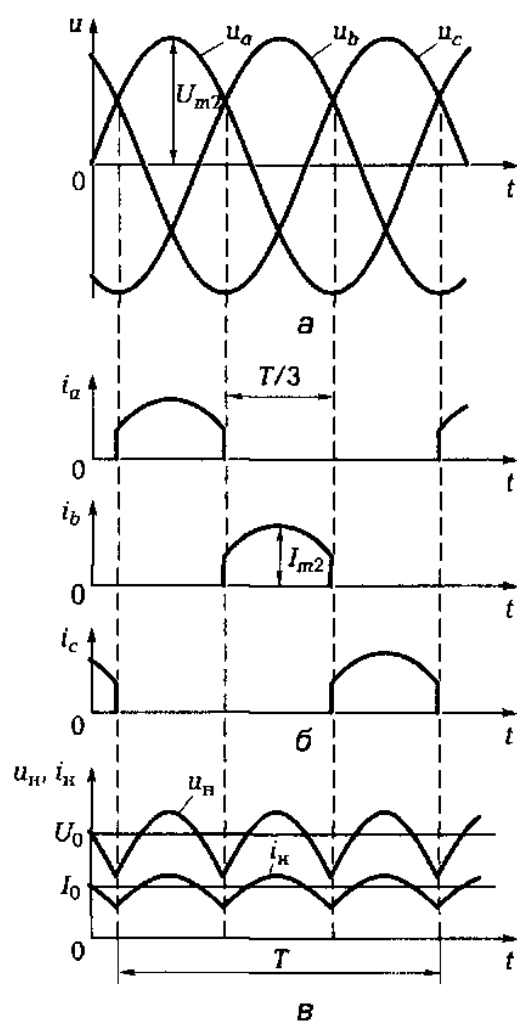


Рис. 14.9

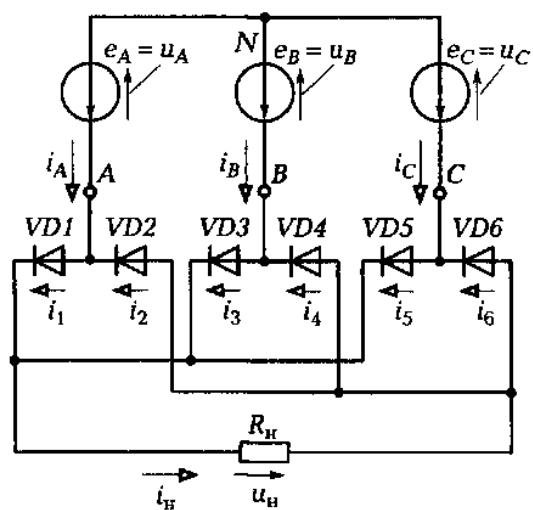


Рис. 14.10

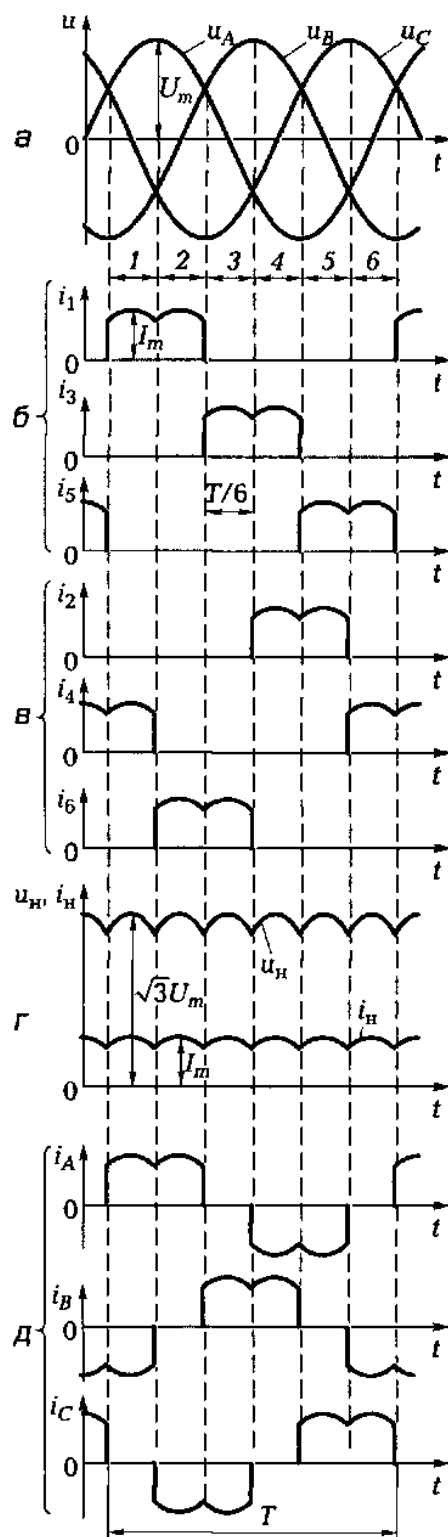


Рис. 14.11

В каждый данный момент времени включен тот диод первой группы, у которого анодный вывод имеет наибольший положительный потенциал $v_{\text{Анод max}} > 0$ относительно потенциала нейтральной точки N , а вместе с ним — диод второй группы, у которого катодный вывод имеет наибольший отрицательный потенциал $v_{\text{Кат max}} < 0$ относительно потенциала этой же точки. Чтобы проследить порядок переключения диодов, разделим один период T работы цепи на шесть равных интервалов времени, как показано на рис. 14.11, а.

В табл. 14.1 для каждого интервала времени приведены величины с наибольшим положительным потенциалом анодов $v_{\text{Анод max}}$ диодов первой группы и с наибольшим отрицательным потенциалом катодов $v_{\text{Кат max}}$ диодов второй группы, а также номера включенных диодов каждой группы. В течение одного периода происходит шесть переключений, т.е. в два раза больше числа фаз $m = 3$.

Работу выпрямителя иллюстрируют совмещенные по времени зависимости токов диодов первой группы i_1, i_3 и i_5 (рис. 14.11, б), токов диодов второй группы i_2, i_4 и i_6 (рис. 14.11, в), тока нагрузки $i_n = i_1 + i_3 + i_5 = i_2 + i_4 + i_6$, выпрямленного напряжения $u_n = R_n i_n$ (рис. 14.11, г) и переменных фазных токов трехфазного источника $i_A = i_1 - i_2, i_B = i_3 - i_4$ и $i_C = i_5 - i_6$ (рис. 14.11, г). Заметим, что максимальное значение выпрямленного напряжения равно амплитуде синусоидального линейного напряжения трехфазного источника $\sqrt{3}U_m$, а максимальное значение выпрямленного тока $I_m = \sqrt{3}U_m/R_n$.

Мощность многофазных неуправляемых выпрямителей обычно средняя или большая (от десятков до сотен киловатт и больше при токах до 100 000 А). Мощность однофазных неуправляемых

Таблица 14.1. Порядок переключения диодов в трехфазной мостовой схеме выпрямителя

Номер интервала	$v_{\text{Анод max}} > 0$	$v_{\text{Кат max}} < 0$	Диод первой группы	Диод второй группы
1	v_A	v_B	VD1	VD4
2	v_A	v_C	VD1	VD6
3	v_B	v_C	VD3	VD6
4	v_B	v_A	VD3	VD2
5	v_C	v_A	VD5	VD2
6	v_C	v_B	VD5	VD4

Ход работы:

1. Изучить теоретическую часть и ответить на вопросы.

Контрольные вопросы

Практическая работа № 24.

Тема 4.1. Структурные схемы вторичных источников электропитания

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 М890G, 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).

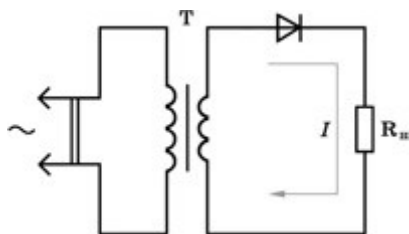


Рис. 96

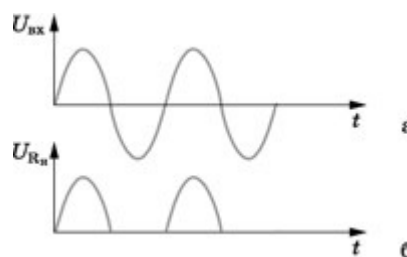


Рис. 97

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» относительно 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).

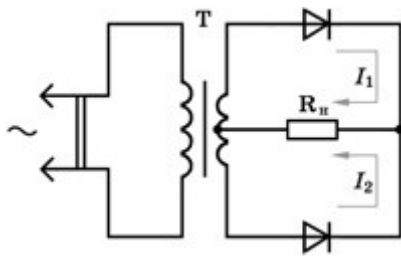


Рис. 98

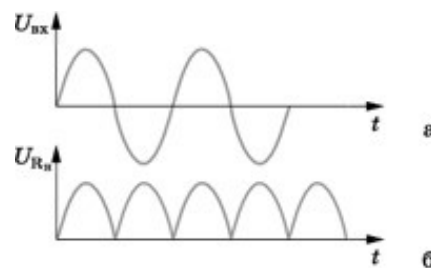


Рис. 99

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%.

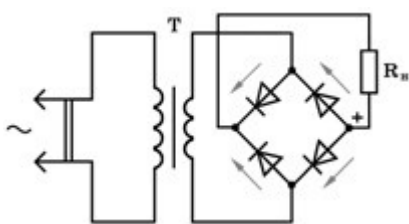


Рис. 100

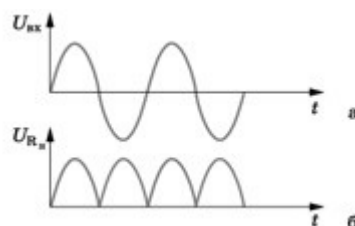


Рис. 101

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).

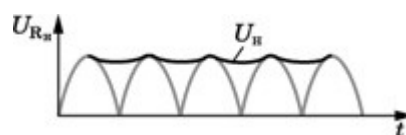
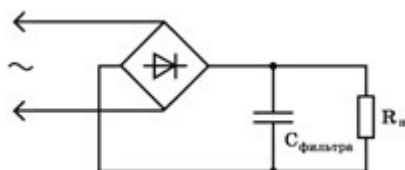


Рис. 102**Рис. 103**

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			

Примечание. Нагрузка должна быть постоянной для любой схемы выпрямителя.

Контрольные вопросы

Практическая работа № 25.

Тема 4.1. Структурные схемы вторичных источников электропитания

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:

Стабилизаторы предназначены для стабилизации режима работы приемника при изменении его нагрузки и влиянии дестабилизирующих факторов. Наиболее распространены электронные стабилизаторы постоянных напряжения и тока.

Стабилизаторы напряжения. Различают параметрические и компенсационные стабилизаторы.

В параметрических стабилизаторах стабилизация постоянного напряжения на выходе осуществляется элементами с нелинейными вольт-амперными характеристиками. Одним из таких элементов является стабилитрон (см. подразд. 13.3).

Принципиальная схема стабилизатора напряжения на основе стабилитрона и его схема замещения приведены на рис. 14.12, а и б, где $R_{\text{диф.ст}}$, $I_{\text{ст}}$ и $U_{\text{пор}}$ — дифференциальное сопротивление, ток и пороговое напряжение проводимости стабилитрона (см. рис. 10.14); $R_{\text{н}}$ и $R_{\text{б}}$ — сопротивления цепи нагрузки и балластного резистора. При изменении напряжения на входе стабилизатора

$$U_{\text{вх}} = U_{\text{пор}} + R_{\text{диф.ст}} I_{\text{ст}} + U_{R_{\text{б}}} = U_{\text{вых}} + U_{R_{\text{б}}}$$

напряжение на его выходе при малом значении дифференциального сопротивления стабилитрона $R_{\text{диф.ст}}$ изменяется незначительно

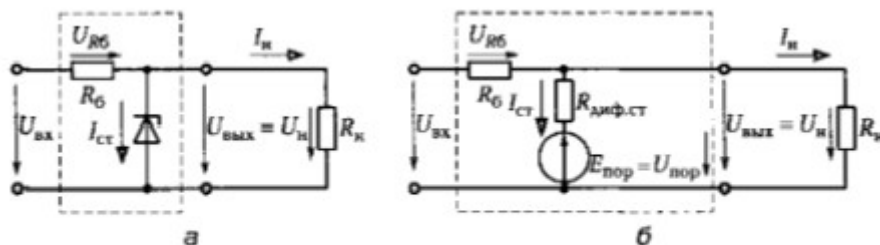


Рис. 14.12

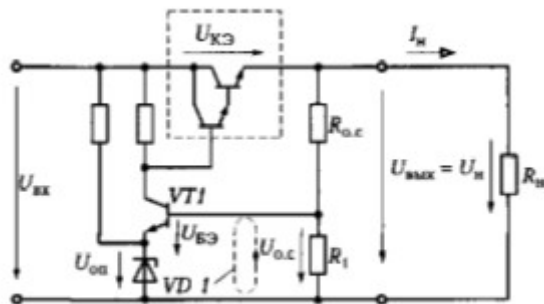


Рис. 14.13

но за счет падения напряжения U_{R0} на балластном резисторе. Параметрические стабилизаторы на основе стабилитронов имеют типовые значения номинального стабилизированного напряжения $U_{ст.ном} = 0,3—100$ В и коэффициента стабилизации 20—50:

$$K_{stab} = \frac{\Delta U_{вх}}{U_{вх}} \frac{U_{вых}}{\Delta U_{вых}}.$$

В компенсационных стабилизаторах стабилизация постоянного напряжения на выходе осуществляется с помощью отрицательной обратной связи по напряжению (см. рис. 15.18, а).

В состав компенсационного стабилизатора любого типа входят регулирующий элемент, устройство сравнения и усилитель постоянного тока. На рис. 14.13 приведена типовая схема компенсационного стабилизатора, в котором роль устройства сравнения и усилителя постоянного тока выполняет транзистор VT1, а регулирующего элемента, отмеченного внутри штриховой линией, — составной транзистор (см. рис. 13.17). Опорное напряжение $U_{ос}$ на стабилитроне VD сравнивается через делитель напряжения на резисторах R_1 и $R_{ос}$ с напряжением обратной свя-

зи $U_{ос} = \frac{R_1}{R_1 + R_{ос}} U_{вых}$, пропорциональным напряжению на выходе

стабилизатора. Разность этих напряжений по второму закону Кирхгофа для контура 1 определяет напряжение между базой и эмиттером транзистора VT1 $U_{БЭ} = U_{ос} - U_{ос}$. Увеличение (уменьшение) напряжения на выходе стабилизатора $U_{вых}$ увеличивает

(уменьшает) напряжение $U_{БЭ}$. Соответственно уменьшается (увеличивается) ток базы I_B составного транзистора и увеличивается (уменьшается) напряжение между его коллектором и эмиттером $U_{КЭ}$, что означает стабилизацию значения напряжения $U_{вых}$.

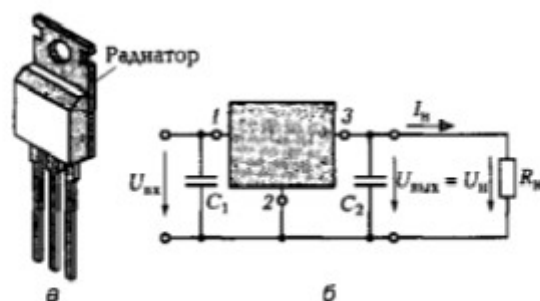


Рис. 14.14

Выпускаются компенсационные стабилизаторы напряжения в виде интегральных схем двух типов с фиксированным и регулируемым напряжением на выходе. Последние для своей работы требуют подключения к ним ряда внешних элементов (до шести—восьми резисторов и конденсаторов). Интегральная схема стабилизатора с фиксированным напряжением на выходе имеет три вывода (рис. 14.14, а) и включается по схеме (рис. 14.14, б). Конденсаторы

емкостью $C_2 \geq 2,2$ мкФ обеспечивает устойчивость при импульсном изменении тока нагрузки I_n . Конденсатор емкостью $C_1 \geq 0,33$ мкФ сглаживает пульсации напряжения (помехи) на входе. Интегральные схемы стабилизаторов напряжения содержат встроенную защиту от перегрузки по току и перегреву, имеют ряд номинальных значений стабилизированного напряжения 1,5—18 В при токах нагрузки до 8 А (табл. 14.2).

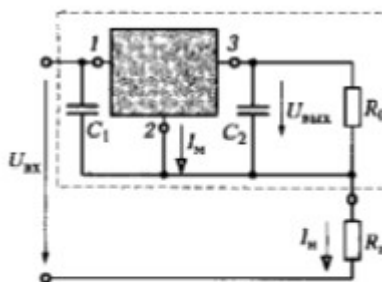


Рис. 14.15

Стабилизаторы тока. Схему компенсационного стабилизатора постоянного напряжения на рис. 14.13 можно преобразовать в схему компенсационного стабилизатора постоянного тока. Для этого обратную связь по напряжению следует заменить обратной связью по току (см. рис. 15.18, б), включив резистор R_1 последовательно в цепь нагрузки. При этом значение напряжения обратной связи будет пропорционально значению тока нагрузки, т.е. $U_{о.с} = R_1 I_n$.

Стабилизированный источник тока можно реализовать также на основе интегральной схемы стабилизатора напряжения по схеме на рис. 14.15, где схема источника тока отмечена внутри штриховой линии. Пренебрегая током интегральной схемы I_m ,

ток в цепи нагрузки $I_n = \frac{U_{вых}}{R_0}$ не зависит от ее сопротивления R_n .

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 напряжении 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	Кст=Δ U_{ВХ}/Δ U_{ВЫХ}
U_{ВХ}				
U_{ВЫХ}				

Таблица 2

Положение переключателя S1(I_н)		1	2	3	Кст=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 **Кст = Δ U_{ВХ}/Δ U_{ВЫХ}** для табл. 1 и табл.26. **Отчет должен содержать:**

6.1. Наименование работы

6.2. Цель работы

6.3. Графики

6.4. Ответы на контрольные вопросы

К каждому отчету должна прилагаться ксерокопия описания лабораторной работы.

Контрольные вопросы

1. Приведите классификацию стабилизаторов и их основные параметры.

2. Нарисовать блок-схему стабилизатора с управляемым прибором.
3. Поясните назначение элементов транзисторного стабилизатора.
4. Какие типы стабилизаторов применяются в устройствах аудиовидеотехники?

Практическая работа № 26.

Тема 4.2 Типовые блоки питания устройств информационных систем.

Практическая работа по теме «Источников бесперебойного питания».

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

Перечень используемого оборудования:

Теоретическая часть:

С повышением требований информационных систем к электропитанию необходимость в системах бесперебойного питания становится все очевиднее.

Для защиты ИТ-оборудования от перебоев в электросети и некачественного электропитания широко применяются источники бесперебойного питания (Uninterruptible Power Supply, UPS) — ИБП. Это дополнительное оборудование, предназначенное для электропитания ИТ-систем или других устройств при кратковременном (до нескольких десятков минут) отключении основного электропитания, а также для защиты от помех и бросков в электросети и поддержания параметров питания в допустимых пределах. То есть ИБП также могут использоваться для улучшения качества электропитания.



По конструктивному исполнению ИБП можно разделить на настольные, напольные и стоечные (19"). Основное назначение любого ИБП — защита нагрузки от возможных проблем в цепях электропитания. По статистике, каждый ПК ежемесячно подвергается воздействию около 120 нештатных ситуаций, связанных с проблемами электропитания. В их числе:

Всплески напряжения	Повышения напряжения более чем на 10% в течение более 20 мс.
Высоковольтные броски питания	Кратковременные импульсы напряжением до 6000 В и длительностью до 10 мс.
Провалы питания	Кратковременное снижение напряжения до уровня менее 80-85% от номинального.

Высокочастотные помехи	Помехи электромагнитного или другого происхождения.
Выбег частоты	Уход частоты на величину более 3 Гц от номинала (50 Гц).
Подсадка напряжения	Падение напряжения в сети на длительное время.
Пропадание напряжения	Отсутствие напряжения в электросети в течение более 40 мс.

Таким образом, ИБП сглаживают небольшие и кратковременные броски питания, фильтруют питающее напряжение, но их главная задача — питать нагрузку в течение некоторого времени после пропадания напряжения в сети. Многие модели с помощью программного обеспечения могут автоматически завершать работу ИТ-оборудования при продолжительном отсутствии напряжения в питающей сети, а также перезапускать его при восстановлении сетевого питания или по таймеру. Некоторые ИБП предусматривают функции мониторинга и записи параметров источника питания (таких как температура, уровень заряда батарей и другие показатели), отображение параметров напряжения и частоты тока, выходного напряжения и мощности, предупреждение об аварийных ситуациях и пр. При пропадании напряжения в электросети любые ИБП переключают нагрузку на питание от батареи, но есть важные отличия.

Батареи: альтернатива свинцово-кислотным аккумуляторам

Сегодня 95% всех источников бесперебойного питания производятся с использованием свинцово-кислотных батарей в качестве источника постоянного тока.

Тем временем некоторые вендоры уже объявили о начале перевода нескольких моделей устройств бесперебойного питания со свинцово-кислотных аккумуляторов на литий-ионные. Их начальная стоимость пока что выше свинцово-кислотных, однако за последние несколько лет разрыв в ценах существенно сократился.

По данным Schneider Electric, в зависимости от сферы применения литий-ионных аккумуляторов в общей стоимости владения в течение срока их службы можно добиться экономии в 10-40% по сравнению с традиционными аккумуляторами.

Литий-ионные аккумуляторы (Li-ion) накапливают гораздо больше энергии в меньшем объеме. Так, в сравнении со свинцово-кислотными аккумуляторами с клапанным регулированием (VRLA) равной мощности они занимают втрое меньше места. А благодаря длительному сроку службы существенно сокращаются объемы работ и расходов по их замене.

Между тем подавляющее большинство ИБП по-прежнему комплектуется свинцово-кислотными батареями, известными своей надежностью, высоким качеством и оптимальными ценовыми характеристиками.

Классы ИБП

По принципу действия ИБП делятся на три основных класса: резервные ИБП (off-line), линейно-интерактивные (line-interactive) и ИБП с двойным преобразованием (on-line). Тип ИБП определяется соотношением параметров на входе и выходе устройства. У первых частота и напряжение на выходе определяются частотой и напряжением на входе; вторые стабилизируют напряжение на выходе при совпадении частот, а ИБП с двойным преобразованием преобразуют переменное напряжение в постоянное и вновь генерируют на выходе переменное (синусоидальное) напряжение, характеристики которого не зависят от па-

раметров на входе ИБП.
 В резервных (или пассивных) ИБП нагрузка питается напрямую от электросети, как правило, через помехоподавляющий фильтр. При отказе электросети нагрузка переключается на резервное питание от инвертора, питающегося от батарей. Такие ИБП просты и недороги, имеют высокий КПД, но не стабилизируют напряжение и частоту электросети, а переключение на питание от батарей происходит за несколько миллисекунд. Их мощность обычно невелика — от 220 до 2000 ВА.

Резервные ИБП:

Достоинства	Недостатки
— Компактность, малый вес, экономичность, относительная дешевизна.	— Отсутствует стабилизация выходного напряжения; — Неполная фильтрация сетевого напряжения от помех и выбросов; помехи, генерируемые нагрузкой пропускаются обратно в сеть; — Скачкообразное изменение напряжения, частоты и формы выходного напряжения при переходе на питание от батареи (время переключения >5 мс); — Прямоугольная форма выходного напряжения вместо синусоидальной.

Типовая область применения резервных ИБП — защита ПК или вспомогательного оборудования, где значимость хранимой информации или выполняемых операций сравнительно невелика. Эта топология не подходит в случае частых отключений или при некачественном электропитании.

Схема работы простейшего резервного ИБП показана на рис. 1.

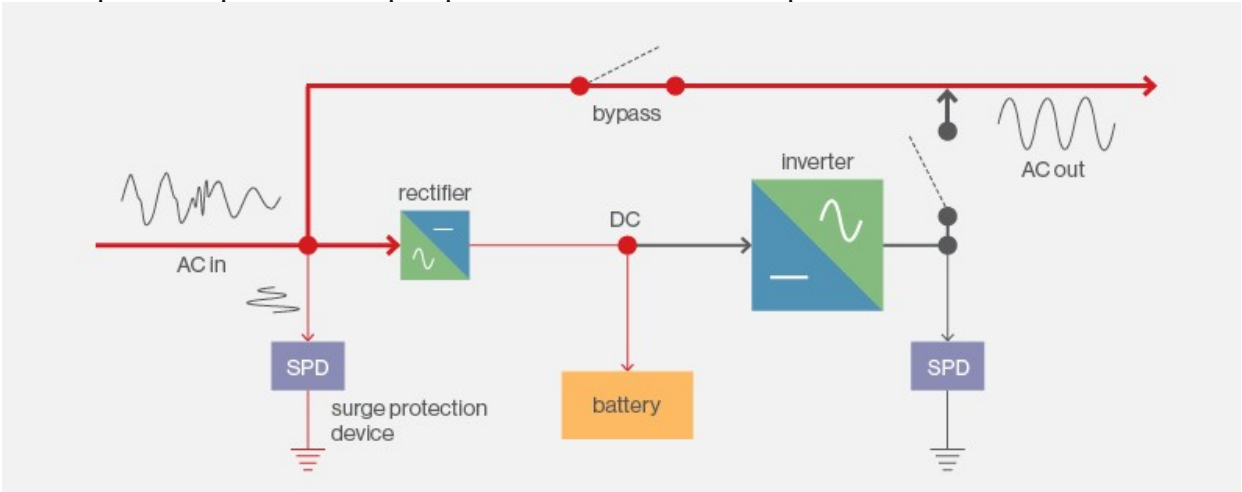


рис. 1.
 ИБП резервного типа: нормальный режим работы (rectifier — выпрямитель, inverter — инвертор, SPD — фильтр питания, bypass — байпас).

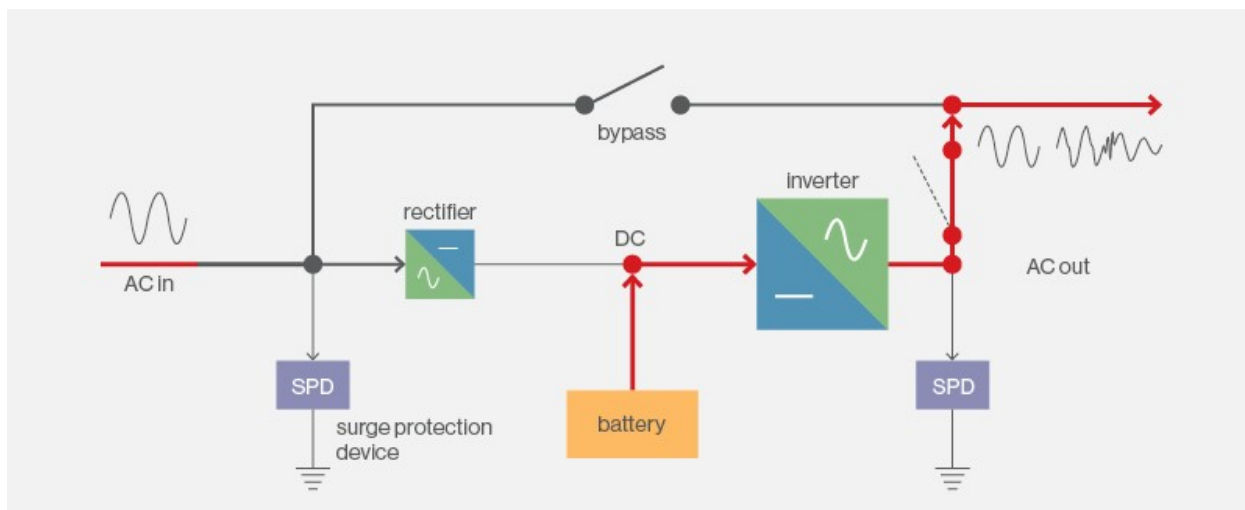


рис. 2.
ИБП резервного типа: аварийный режим работы.

Для защиты более важного оборудования, например, серверов начального уровня, сетевого и телекоммуникационного оборудования, лучше использовать линейно-интерактивные ИБП. Они обеспечивают стабилизацию напряжения питания в заданном диапазоне и снижают влияние переходных процессов на работоспособность защищаемого оборудования.

Линейно-интерактивные ИБП поддерживают параметры питающего напряжения и синхронно переключают нагрузку на инвертор при его пропадании. В них инвертор включен параллельно электросети, он регулирует и стабилизирует выходное напряжение, одновременно заряжая батареи. Иногда ИБП дополняют автотрансформаторами, что позволяет расширить диапазон регулирования напряжения без перехода на батарею.

Преимущества данной технологии — стабилизация напряжения, меньшее время переключения на батареи и хорошо аппроксимированная синусоидальная форма напряжения на выходе ИБП. Существуют и более дешевые разновидности линейно-интерактивных ИБП со «ступенчатой» синусоидой.

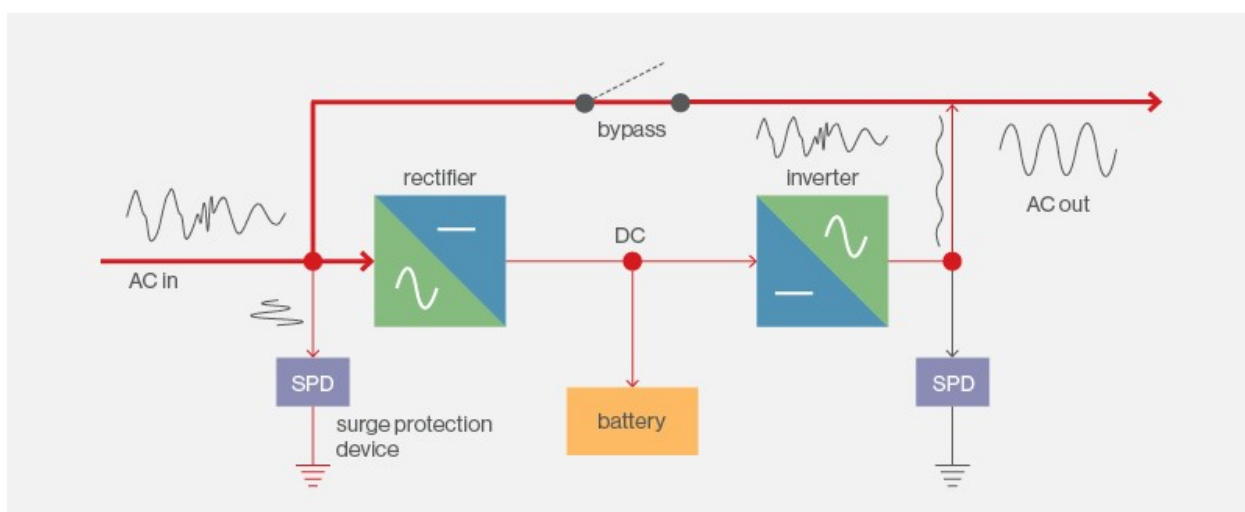


рис. 3.
Линейно-интерактивный ИБП: нормальная работа.

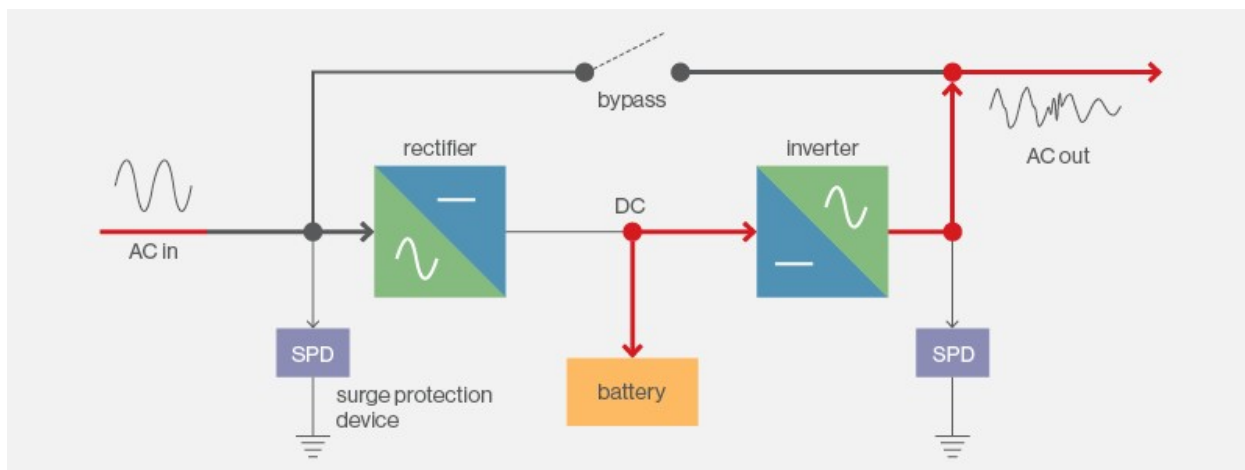


рис. 4.
Линейно-интерактивный ИБП: аварийный режим.

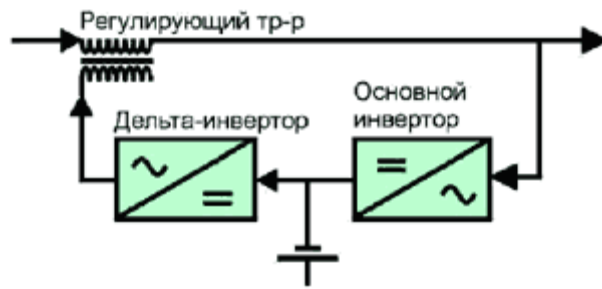
Линейно-интерактивные ИБП:

Достоинства	Недостатки
— Компактность, экономичность; — Ступенчатая стабилизация входного напряжения; — Почти синусоидальная форма выходного напряжения; — Невысокая стоимость.	— Они дороже, чем резервные; — Отсутствие реальной изоляции нагрузки от сети распределения питания; — Отсутствие регулировки и стабилизации входной частоты; — Сравнительно слабая стабилизация выходного напряжения, особенно при переходных процессах или в случае пошагового изменения нагрузки; — Низкая эффективность при питании нелинейных нагрузок.

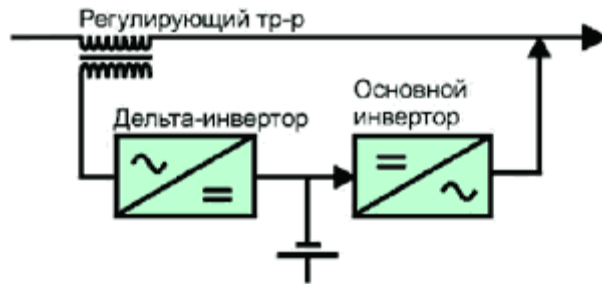
Линейно-интерактивные ИБП можно использовать для защиты профессиональных рабочих станций, серверов среднего уровня, коммутаторов, маршрутизаторов и другого сетевого оборудования, но они не подходят для защиты сложного и дорогостоящего оборудования, чувствительного к электромагнитным помехам, колебаниям напряжения питания и нестабильности частоты питания, например, медицинского.

Линейно-интерактивные ИБП не годятся и для защиты непрерывных технологических процессов, а также для построения централизованных систем гарантированного электропитания, где важно обеспечить полную независимость электрических параметров на выходе ИБП от параметров на входе.

Разновидность линейно-интерактивных систем — ИБП с дельта-преобразованием напряжения. Благодаря усовершенствованной обратной связи напряжение на нагрузке у них регулируется плавно, а не ступенчато, обеспечивается стабилизация частоты выходного напряжения.



**ИБП с Delta-преобразованием
в нормальном режиме**



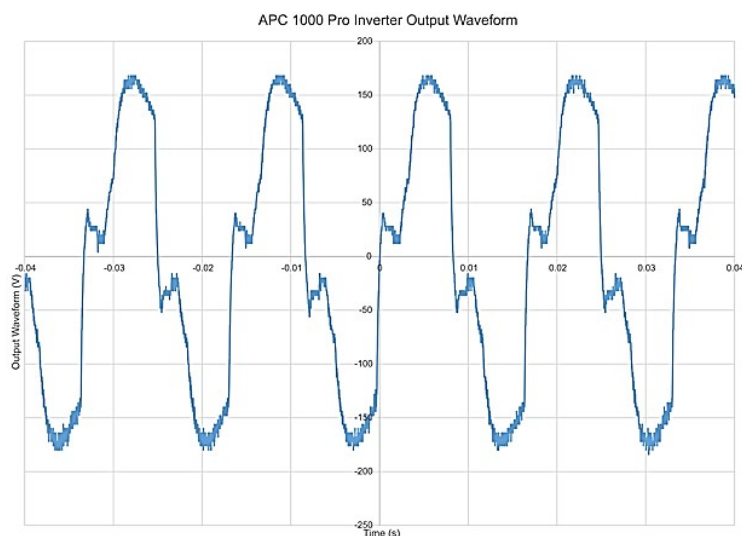
**ИБП с Delta-преобразованием
в автономном режиме**

ИБП с дельта-преобразованием в штатном и автономном режимах.

Главное достоинство ИБП с дельта-преобразованием — высокий КПД. Однако достигается он, когда параметры напряжения сети соответствуют номинальным значениям, входной импеданс нагрузки имеет только активную составляющую, а сам ИБП нагружен на полную мощность. В противном случае повышается нагрузка на основной и дельта-инвертор, или снижается эффективность использования входного трансформатора, что ухудшает КПД. К тому же эффекту приводит расширение диапазона входных напряжений для нормального режима работы. В итоге, имея преимущество по КПД (2-3%) в идеальных условиях, ИБП с дельта-преобразованием проигрывают линейно-интерактивным в условиях реальных.

ИБП с дельта-преобразованием:

Достоинства	Недостатки
— Высокий КПД (при идеальных параметрах входного напряжения); — Высокий коэффициент мощности по входу (не требуется применение корректирующих фильтров).	— Повышенная сложность из-за применения двунаправленных инверторов и, соответственно, меньшая надежность; — Меньшая степень защиты нагрузки в нормальном режиме работы от резких изменений входного напряжения вследствие инерционности схемы обратной связи; — Отсутствие защиты нагрузки в нормальном режиме работы от отклонений частоты входного напряжения; — Отсутствие встроенной гальванической развязки между входом и выходом.



Линейно-интерактивный ИБП APC BR1000G дает на выходе не совсем чистую синусоиду, но такой аппроксимации достаточно для большинства устройств.

Самый технически совершенный класс источников бесперебойного питания — системы с двойным преобразованием — гарантируют выходные электрические характеристики, близкие к идеальным, как по напряжению, так и по частоте. За это приходится платить усложнением и удорожанием конструкции.

Системы с двойным преобразованием обеспечивают очень малое время переключения на работу от батарей и имеют высокие выходные электрические характеристики. Такие ИБП подходят для критически важных приложений, защиты мощных серверов и кластеров, телекоммуникационного оборудования и локальных сетей. Они имеют высокий КПД в режиме двойного преобразования (95-96%) и синусоидальную форму выходного напряжения.

На российском рынке присутствует более двух десятков моделей ИБП с двойным преобразованием. Примерно половина этих устройств предназначена для монтажа в стойку. Технология двойного преобразования позволяет гарантировать максимальную защиту от перебоев в электросети.

В таких ИБП входное переменное напряжение преобразуется выпрямителем в постоянное, а затем инвертором — обратно в переменное. Даже при больших отклонениях входного напряжения ИБП питает нагрузку чистым синусоидальным стабилизированным напряжением. Инвертор включен последовательно с основным источником электроснабжения и всегда находится во включенном состоянии. При пропадании входного напряжения он переходит на питание от батарей.

В обычном режиме при питании от сети электроэнергия поступает через выпрямитель и инвертор, одновременно подзаряжая батареи. В случае пропадания или сбоя питания на входе ИБП инвертер запитывается от аккумуляторных батарей. Переключение происходит без использования статического переключателя, поэтому переход на работу от батарей мгновенен. Статический ключ в данной схеме используется только для перехода на режим автоматического байпаса для питания нагрузки в случае существенного сбоя в работе ИБП.

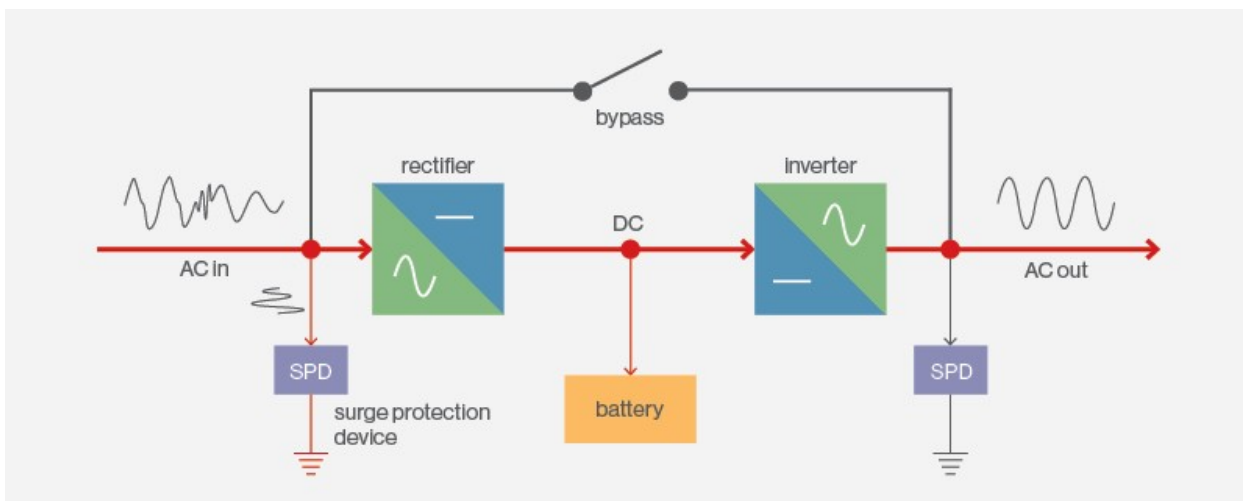


рис. 5.

ИБП с двойным преобразованием отличается надежной защитой нагрузки по электропитанию.

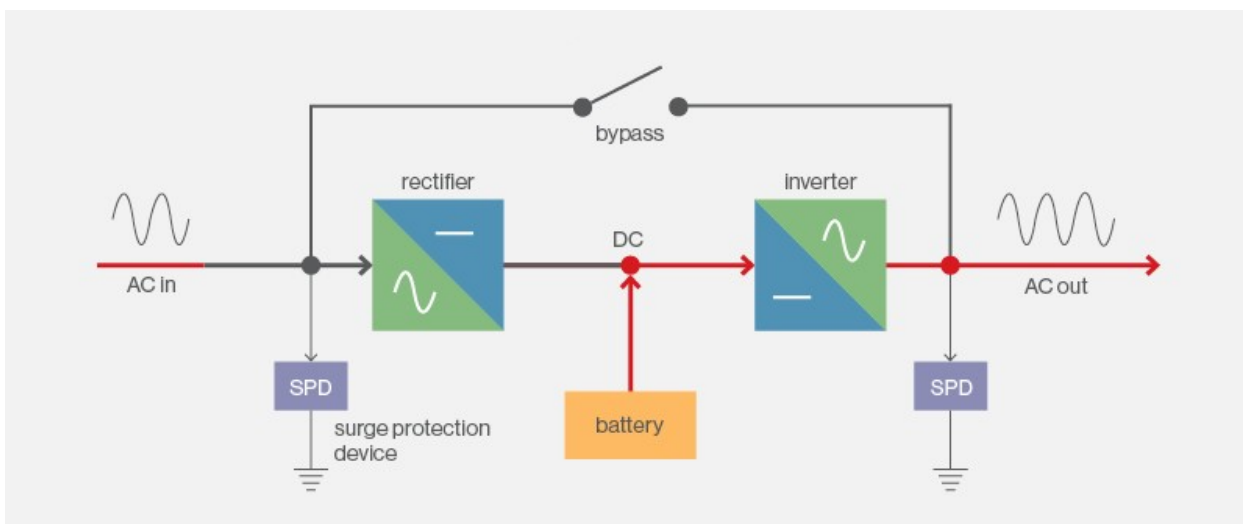


рис. 6.

ИБП с двойным преобразованием: аварийный режим, питание от батареи.

В ИБП с двойным преобразованием поддерживается точная регулировка напряжения и частоты на выходе ИБП, бесперебойно осуществляется переход в байпас. Ручной байпас можно использовать для обслуживания и «горячей» замены батарей и самого ИБП.

Такие ИБП отличаются постоянной стабилизацией напряжения и частоты, непрерывностью фазы выходного напряжения, отсутствием влияния нагрузки на сеть, полной фильтрацией питания. Но есть и отрицательные стороны — сложность конструкции и высокая цена, относительно невысокий КПД. Диапазон мощностей выпускаемых устройств очень широк — от 600 ВА до нескольких сотен кВА.

ИБП с двойным преобразованием:

Достоинства	Недостатки
— Максимальная фильтрация сетевого напряжения от помех и выбросов; помехи, генерируемые нагрузкой, не пропускаются обратно в сеть;	— Относительная сложность и более высокая стоимость;

— Питание нагрузки «чистым» синусоидальным электропитанием, стабилизированным по величине, частоте и форме напряжения, при работе от сети и от батарей; — Переключение на батареи происходит мгновенно, при этом любые переходные процессы отсутствуют.	— Дополнительные энергозатраты на двойное преобразование напряжения, снижающие КПД; — Невысокий коэффициент мощности по входу (для его повышения требуется дополнительный элемент — THD-фильтр).
---	--

Краткое сравнение ИБП разных классов

	Резервные	Линейно-интер-активные	С двойным преобразованием
Мощность ИБП	менее 1,5 кВА	менее 4 кВА	не ограничена
Режим работы от сети			
Стабилизация напряжения	нет	ступенчатая	полная
Стабилизация частоты	нет	Нет	есть
Фильтрация помех	слабая	средняя	максимальная
Батарейный режим			
Частота переходов	частая	средняя	редкая
Время перехода на батареи	5-15 мс	2-6 мс	нет
Форма синусоиды	часто трапецеидальная	синусоидальная	синусоидальная
режим «байпас»	нет	нет	есть
гальваническая развязка	Нет	нет	возможна

Между тем отрасль давно нуждалась в более точной классификации ИБП. Согласно стандарту IEC 32040, введены три буквенных обозначения: VFI, VI и VFD.

Класс VFI (Voltage & Frequency Independent) — выходные напряжение и частота ИБП не зависят от входных параметров.

- **Класс VI** (Voltage Independent) — выходная частота совпадает с входной, напряжение на выходе регулируется в заданных пределах.

- **Класс VFD (Voltage & Frequency Dependent)** — выходное напряжение и частота совпадают с входными.

Вот как это соотносится с топологией ИБП:

Топология ИБП	Спецификация	Типовая мощность	Типовое применение
Резервный	Voltage & Frequency Dependent (VFD)	1500 ВА	Малый офис, домашние ПК и другие не критичные среды
Линейно-интерактивный	Voltage Independent (VI)	5000 ВА	Малый бизнес, веб-сайты, серверы подразделений
С двойным преобразованием	Voltage and Frequency Independent (VFI)	1000 кВА	Дата-центры

В классификации учитывается также степень несинусоидальности выходного напряжения ИБП в нормальном (при работе от сети) и автономном режиме (при работе от батарей). Первая буква соответствует характеристике формы напряжения для нормального режима, вторая — для автономного.

S соответствует синусоидальному выходному напряжению с коэффициентом нелинейных искажений (КНИ) менее 8% как при линейной, так и при нелинейной нагрузке.

- **X** соответствует несинусоидальному сигналу с КНИ более 8% при нелинейной нагрузке.
- **Y** соответствует несинусоидальному сигналу при любой нагрузке, КНИ превышает установленные в IEC 61000-2-4 пределы.

Наконец, во внимание принимаются динамические характеристики ИБП — колебания амплитуды выходного напряжения при изменении режима работы и 100% скачкообразном изменении величины нагрузки. Первый символ в этой классификации — колебания выходного напряжения при изменении режима работы ИБП (нормальный, автономный, байпас).

Второй символ характеризует колебания выходного напряжения при 100% изменении линейной нагрузки. Тестирование проводится в нормальном и автономном режимах, выбирается наихудший показатель. Третий символ характеризует колебания выходного напряжения при 100% изменении нелинейной нагрузки. Конечно, ИБП имеют и другие характеристики, и их немало.

Характеристики ИБП

Перечислим кратко главные характеристики ИБП

Диапазон изменения входного напряжения, при котором ИБП не переключаются на батареи.	Чем он больше, тем меньше количество переходов на батарею, что увеличивает срок ее службы. Это особенно актуально для электросетей в российских регионах, где нередки «просадки» напряжения.
Изменение выходного напряжения при изменении входного.	ИБП должен обеспечивать выходное напряжение для нормальной работы оборудования. Выход за допустимый диапазон может вызвать сбои в работе оборуду-

	дования или даже вывести его из строя.
Параметры выходного напряжения при работе от батареи.	Эти параметры определяют качество питания, обеспечиваемое ИБП.
Процесс переключения ИБП на батарею и обратно.	Для защищаемого оборудования все переходные процессы должны быть «незаметны», выполняться быстро и корректно.
Поведение ИБП при перегрузке.	При перегрузке в режиме работы от батарей ИБП выключается, то есть при пропадании напряжения в сети оборудование будет обесточено. Некоторые ИБП обеспечивают индикацию (в том числе звуковую) перегрузки и/или защиту от перегрузки.
Наличие «холодного» старта.	Возможность включить ИБП при отсутствии напряжения в сети может пригодиться, например, если во время длительного пропадания питания нужно на короткое время включить компьютер, или требуется протестировать систему.
Стабилизация частоты питания.	Некоторые виды оборудования требуют стабильной частоты питающего напряжения.
Поддержка программного обеспечения и наличие интерфейса для подключения к ПК.	«Интеллектуальные» ИБП поддерживают программируемое отключение наименее критичных нагрузок в моменты перегрузки. Многие современные ИБП поставляются также со специальными программами, позволяющими сохранять файлы статистики работы устройства.
Выходная мощность, измеряемая в вольт-амперах (ВА) или ваттах (Вт).	Мощность считается одной из основных характеристик. Если суммарная мощность нагрузки будет превышать мощность ИБП, то это может привести к выходу последнего из строя, или постоянным перегрузкам. Нужно знать, какую мощность потребляет ПК и все подключаемые к нему устройства. Активная мощность ИБП должна быть как минимум на 10-15% больше суммы мощностей блока питания ПК и монитора.
Время автономной работы при питании нагрузки.	Оно определяется емкостью батарей и мощностью подключенного к ИБП оборудования. У большинства офисных ИБП равняется 4-15 минутам.
Срок службы аккумуляторных батарей.	Обычно свинцовые аккумуляторные батареи значительно теряют свою емкость уже через 3-4 года. Срок их эксплуатации зависит от цепи зарядки батареи. В современных ИБП применяются технические решения, продлевающие жизнь батареи и допускающие ее замену. Появляются ИБП малой мощности с десяти-

	тилетними аккумуляторными батареями емкостью 9–18 А*ч (которые в реальности работают пять-семь лет) вместо пятилетних (которые реально служат три года).
Количество разъемов питания (розеток).	Нужно подсчитать, сколько устройств требуют защиты по питанию. Наряду с разъемами бесперебойного питания в ИБП часто имеются дополнительные розетки просто с защитой от скачков напряжения. Учитывайте тип розеток — евро (CEE 7/4) или компьютерные (С-13 или С-14).
Индикация режима работы.	ИБП способны не только подавать звуковые сигналы в случае переключения режима, но и выдавать информацию с помощью светодиодов или выводить ее на ЖК-экран, где могут отображаться до 20 различных состояний, а также дополняются средствами управления (например, через SNMP). Некоторые модели способны информировать о необходимости замены батареи.
Форма напряжения на выходе.	Форма выходного напряжения может быть синусоидальной или аппроксимированной. Блоки питания ПК с активным PFC «плохо дружат» с ИБП, у которых ступенчатая аппроксимация синусоиды. С другой стороны, инвертор синусоидального сигнала более сложен, имеет более низкий КПД.
AVR	ИБП с хорошей работой автоматического регулятора напряжения (AVR) нужны тем, у кого напряжение в сети нестабильно.
Фильтр питания.	Правильный фильтр питания состоит из четырех конденсаторов и двух дросселей, в фильтре попроще дроссели заменяются на резистор или специальные перемычки. В некоторых ИБП нет фильтра — они снабжаются только варисторным ограничителем. Хотя для современной техники фильтр не является необходимостью, если его нет, то стоит внимательнее присмотреться выбираемой модели. Возможно, производитель экономит не только на фильтре.
Акустический шум.	Все ИБП издадут шум при работе от батареи, но некоторые еще и при зарядке батарей. В общем случае лучше выбрать ИБП без вентилятора, если он не будет устанавливаться в серверной комнате.
Зарядка батареи.	Зарядная схема ИБП должна обеспечить оптимально быструю зарядку батареи до нужного напряжения. Однако слишком быстрая зарядка, как и зарядка до повышенного напряжения приводит к преждевременному износу батареи, а медленная не обеспечивает

Некоторые блоки питания ПК используют функцию активной коррекции коэффициента мощности (PFC) и не всегда корректно работают с приближенной, не «чистой» синусоидой питания. Это может приводить к периодической перезагрузке системы.

Мощность ИБП может указываться в вольт-амперах (ВА) или в ваттах (Вт). ВА представляет максимальную теоретическую мощность на выходе ИБП, однако доступная мощность в Вт меньше — 60% от номинала в ВА. То есть ИБП на 1000 ВА соответствует ИБП на 600 Вт.

Не стоит перегружать ИБП. Например, для защиты нагрузки в 300 Вт лучше применять ИБП на 400-600 Вт. Такой вариант надежнее и обеспечивает большее время автономной работы. Учтите также, что емкость батареи со временем падает. И не подключайте к ИБП оборудование с пиковым потреблением мощности, способное вызвать перегрузку источника питания, такое как лазерные принтеры. Некоторые ИБП имеют защиту от перегрузки.

Задача электропитания при длительном отсутствии напряжения обычно решается с помощью установки бензиновых или дизельных генераторов. Но зачастую шум, выхлопные газы, необходимость периодического обслуживания, а также высокие требования к качеству электропитания делают использование генератора неприемлемым. В таких случаях рекомендуется применение специализированных ИБП с внешним батарейным комплектом большой емкости.

Под защитой ИБП

Перебои в работе информационных систем нередко ведут к большим финансовым убыткам, поэтому приходится принимать во внимание угрозу некачественного электроснабжения, возможные перебои и даже долговременное отключение электропитания.

В мире более 40% проданных систем бесперебойного питания используется для защиты серверов, систем хранения данных, сетевого оборудования. Около 60% потребления ИБП приходится на локальные сети, телекоммуникации и ЦОД, значительное количество применяется в промышленности, поскольку многие производственные процессы требуют качественного энергообеспечения.

Около четверти мировых продаж ИБП приходится на устройства мощностью менее 1 кВА, и примерно половина продаж — на устройства мощностью до 5 кВА. Обычно их используют для защиты ПК и серверов начального уровня. В России свои ПК с помощью ИБП защищают не более 15% пользователей — большинство довольствуются сетевым фильтром.

Увеличение популярности ноутбуков также спросу на ИБП не способствует, однако серверы любого класса и сетевое оборудование, учрежденческие АТС все же нуждаются в подобной защите.

В отличие от мощных ИБП (свыше 20 кВА), жизненный цикл которых достигает 20 лет, маломощные источники питания рассчитаны на пятилетний срок службы, однако сменный блок аккумуляторов (самой недолговечной части устройства) позволяет продлить их эксплуатацию.

В небольших офисах обычно используются резервные или линейно-интерактивные ИБП. Последние относительно недороги, обладают приемлемой функциональностью и достаточным классом защиты. Более половины производителей выпускают ИБП малой и даже средней мощности в Юго-Восточной Азии по OEM-контрактам.

Для недорогих «простых» ИБП тенденцией развития стало приближение их по функциональности и эффективности (таким как ремонтный байпас для «горячей» замены или ремонта оборудования, управляемые розетки и расширенная комплектация) к «большим» ИБП.

При выборе ИБП нужно учитывать сроки гарантии на само устройство и его компоненты,

например, аккумуляторы. Отдавайте предпочтение известным производителям, которые специализируются на изготовлении подобного оборудования. Определитесь с максимальным количеством и типом розеток для подключаемых устройств. В тех случаях, когда помимо периодического отключения электричества существуют проблемы параметрами электропитания, необходимо устанавливать линейно-интерактивные устройства.

В общем случае не следует гнаться за временем работы от АКБ, оно составляет обычно до 5 минут при 100% нагрузке. Лучше выбрать модель с дополнительными батарейными модулями или купить генератор. Это дешевле, чем тратится на герметичные необслуживаемые АКБ.

Источники бесперебойного питания берегут компьютерную технику от сбоев в электрической сети. Хороший ИБП надежно защитит электронные устройства от перегрузок, позволит сохранить все данные и корректно завершить работу системы при аварии в электросети. Лучше не экономить на цене устройства, и купить как минимум линейно-интерактивный ИБП, а для защиты критичных систем использовать ИБП с двойным преобразованием.

ИБП в ЦОД

Перебои в работе ЦОД наносят серьезный урон их клиентам и имиджу самих компаний. Поэтому владельцам важно находить эффективные решения для повышения надежности электропитания своих дата-центров. Мировые производители систем бесперебойного питания для дата-центров предлагают свои варианты реализации ИБП.

Какие основные требования предъявляются к «ИБП для ЦОД»? Это высокая надежность (с учетом времени восстановления системы, т.е. важен не параметр MTBF, а коэффициент готовности); высокий КПД при неполной нагрузке (50-80%), что непосредственно отражается на тепловыделении и экономичности оборудования; поддержку параллельной работы с наращиванием мощности или повышением степени резервирования; масштабируемость; высокий входной и выходной коэффициент мощности и малый коэффициент гармонических искажений входного тока, что особенно важно при организации резервного питания от ДГУ.

Другие важные факторы — компактность систем, поддержка параллельной работы, низкое тепловыделение, интеллектуальная система управления зарядом АКБ, простое техническое обслуживание и поддержка, усовершенствованные возможности выключения серверов (есть версии ПО, позволяющие осуществлять корректное завершение работы виртуальных машин), средства управления/мониторинга, в том числе дистанционного, возможность простого и интуитивно понятного переключения на внешний байпас с защитой от неверных действий персонала, хорошая поддержка со стороны производителя оборудования.

При отсутствии системы резервного электропитания от ДГУ увеличить время автономной работы можно за счет внешних аккумуляторных шкафов. В числе обязательных функций ИБП старшего класса — интеллектуальные системы управления зарядом АКБ, средства оповещения оборудования о низком заряде аккумуляторных батарей. Применение в ЦОД энергоэффективных ИБП помогает снизить потребление электроэнергии, при этом мощность и надежность источников бесперебойного питания остаются неизменными.

ИБП с двойным преобразованием обеспечивают наивысшую степень защиты от различных сбоев в электросети, так как ИТ-системы полностью ограждены от воздействия электросети и запитываются от ИБП напрямую. При использовании такого ИБП оборудование защищено от проблем, связанных с перепадами напряжения, исчезновения питания и другими возможными сбоями электросети. По этой причине ИБП с двойным преобразованием используются для обеспечения питания серверов, чувствительного к состоянию сети оборудования и других критичных устройств, от которых зависит функционирование ЦОД. Кроме того, ИБП с двойным преобразованием имеют большой арсенал функций, а также гибкие возможности масштабируемости.

FSP Group уже некоторое время назад уловила тренды растущего рынка ЦОД и начала

выпуск специализированного оборудования, которое призвано снабдить провайдеров телеком-услуг необходимыми источниками энергии. Источники бесперебойного питания с двойным преобразованием серии CUSTOS 9X компании FSP покрывают диапазон мощностей от 1К до 10К.

ИБП с двойным преобразованием FSP Custos 9X+ 10K.

Например, ИБП Custos 9X+ 10K имеет следующие особенности конструкции:

Выходной коэффициент мощности 0,9

- Информативный и понятный ЖК-дисплей сменной ориентации
- Исполнение Rack/Tower
- Программируемые выходы
- Режим преобразования частоты 50/60Гц
- Режимы энергосбережения ECO и Advanced ECO
- Функция экстренного отключения питания (EPO)

В комплект поставки с ИБП входит программное обеспечение ViewPower с поддержкой русского языка, которое позволяет удаленно контролировать параметры работы источников бесперебойного питания, устанавливать график включения и отключения, а также получать уведомления о тревожных событиях по почте или SMS.

ИБП с двойным преобразователем напряжения серии FSP Custos 9X+ могут быть использованы в комплекте с дополнительными батарейными блоками, есть возможность горячей замены источников питания.

Именно эти ИБП применяются для обеспечения бесперебойной работы оборудования в своем ЦОД. Его система бесперебойного гарантированного электропитания построена по классической схеме. Энергоснабжение ЦОД обеспечивают две подстанции, которые питают дата-центр по двум независимым линиям. На объекте установлен комплекс ИБП и ДГУ (схема резервирования — N+1).

Каждый физический сервер подключен к источнику бесперебойного питания. Если эти составляющие вдруг не справятся, то в работу включатся дизель-генераторы, которые обеспечат дата-центр электричеством до решения проблем с подстанцией. Это важная составляющая

Ход работы:

1. Изучить теоретическую часть и ответить на вопросы.

Контрольные вопросы

Практическая работа № 27.

Тема 4. 2. Типовые блоки питания устройств информационных систем.

Поиск 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

E – 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, вздутых 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,

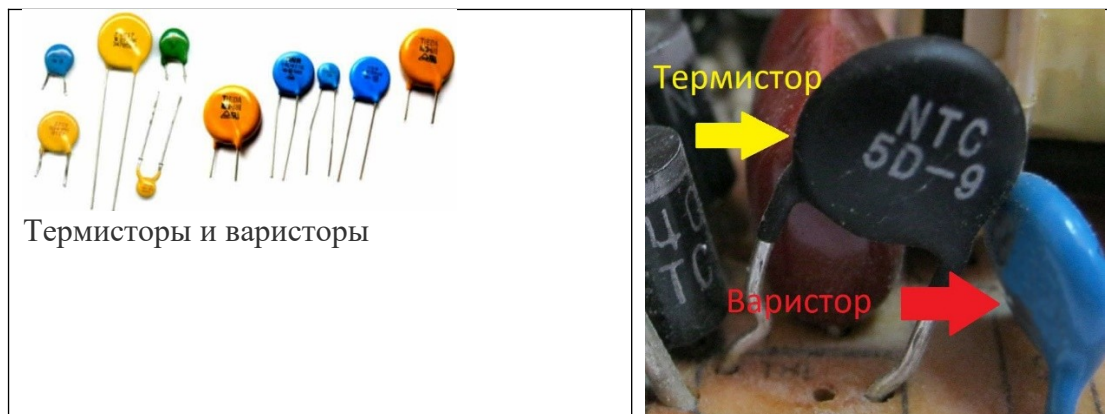
БП работает, но воняет.

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

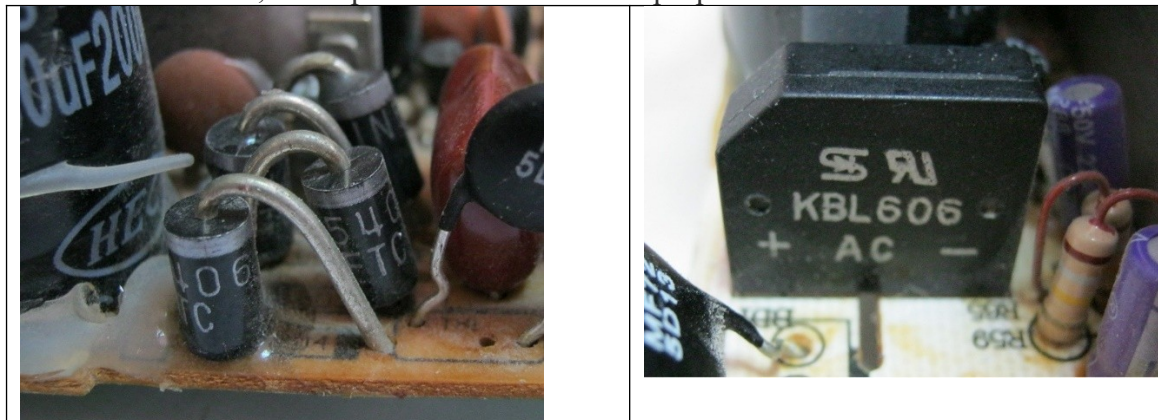


Задачей варистора является защита блока питания от импульсных помех. При возникновении высоковольтного импульса сопротивление варистора резко уменьшается до долей Ома и шунтирует нагрузку, защищая ее и рассеивая поглощенную энергию в виде тепла. При перенапряжении в сети варистор резко уменьшает свое сопротивление, и возросшим током через него выжигается плавкий предохранитель. Остальные элементы блока питания при этом остаются целыми.

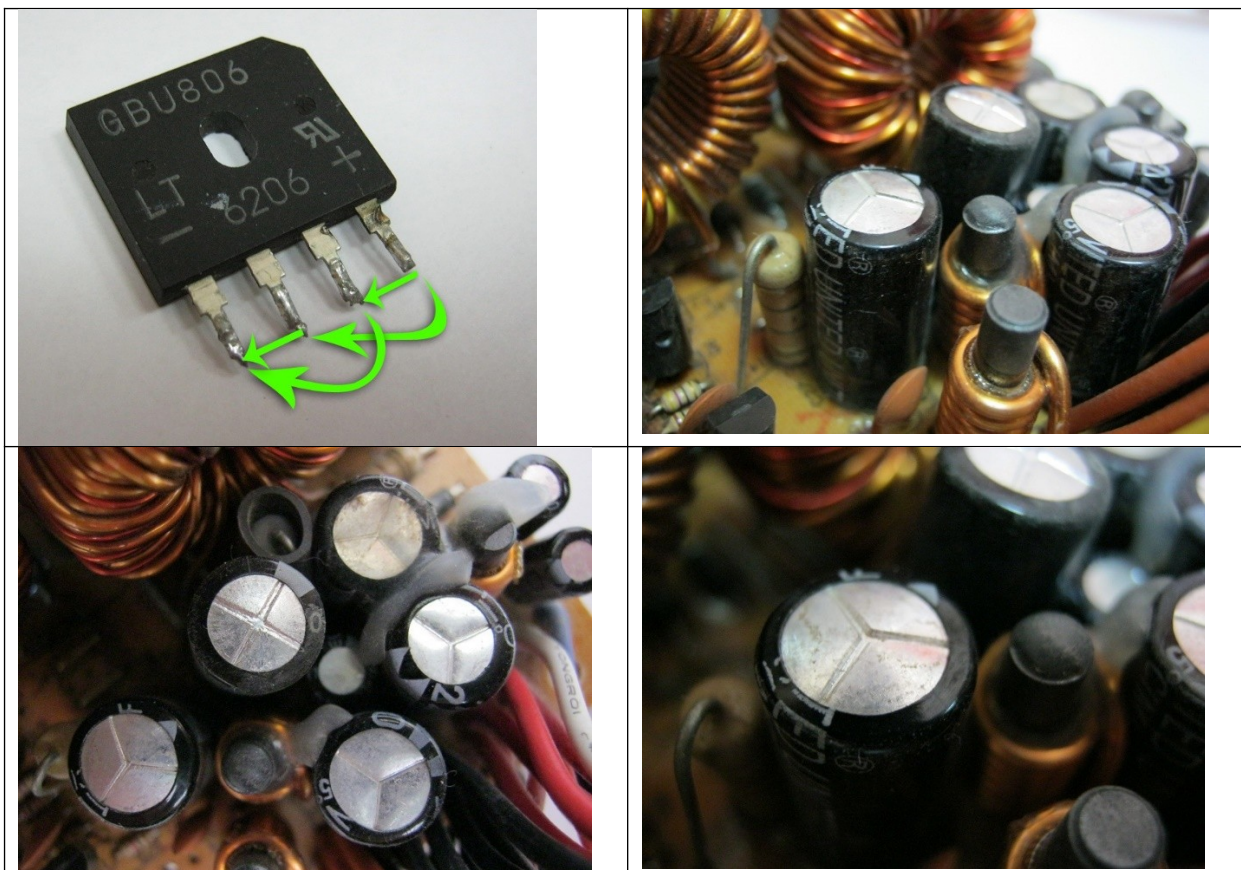
Варистор выходит из строя из-за скачков напряжения, вызванными, например, грозой. Так же варисторы выходят из строя, если по ошибке вы переключили БП в режим работы от 110в. Вышедший из строя варистор обычно определить не сложно. Обычно он чернеет и раскалывается, а на окружающих его элементах появляется 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.

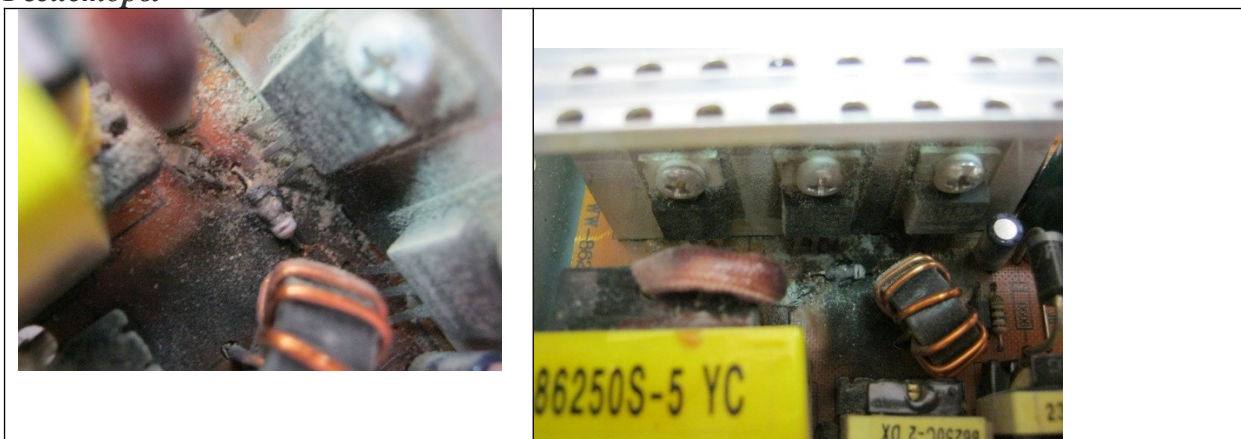


Конденсаторы

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.

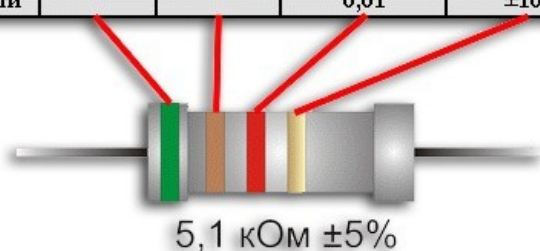
Иногда, высохшие, деградировавшие, конденсаторы выходят из строя, без каких-либо видимых повреждений. В таком случае следует, предварительно выпаяв конденсаторы проверить их емкость и внутренние сопротивление. Если емкость проверить нечем, меняем все конденсаторы на заведомо рабочие.

Резисторы

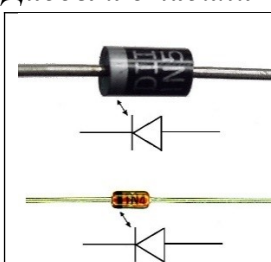


Номинал резистора определяется по цветовой маркировке. Резисторы следует менять только на аналогичные, т.к. небольшое отличие в номиналах сопротивления может привести к тому, что резистор будет перегреваться. А если это подтягивающий резистор, то напряжение в цепи может выйти за пределы логического входа, 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.

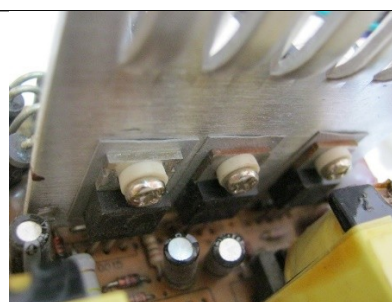
Цвет знака	Номинальное сопротивление, Ом		Множитель	Допуск, %
	Первая полоса	Вторая полоса	Третья полоса	Четвертая полоса
Черный		0	1	
Коричневый	1	1	10	±1
Красный	2	2	100	±2
Оранжевый	3	3	1000	
Желтый	4	4	10 ⁴	
Зеленый	5	5	10 ⁵	±0,5
Голубой	6	6	10 ⁶	±0,25
Фиолетовый	7	7	10 ⁷	±0,1
Серый	8	8	10 ⁸	
Белый	9	9	10 ⁹	
Золотистый		0	0,1	±5
Серебристый			0,01	±10



Диоды и стабилитроны.



Диоды и стабилитроны.



Транзисторы, диодные сборки.

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 выпаявать 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 “позвонке” 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 исправные, то не спешите запаивать радиаторы обратно, т.к. они затрудняют доступ к другим элементам.

ШИМ



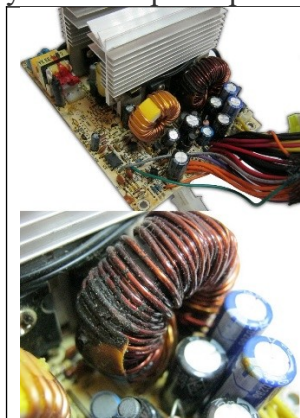
Если ШИМ визуально не поврежден и не греется, то без осциллографа его проверить довольно сложно.

Простым способом проверки ШИМ, является проверка контрольных контактов и контактов питания на пробой.

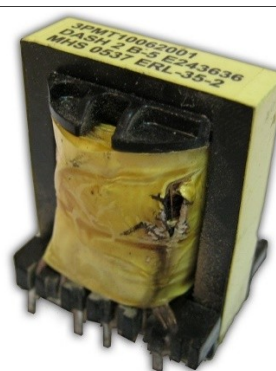
Для этого нам понадобится мультиметр и дата шит на микросхему ШИМ. Диагностику ШИМ следует проводить, предварительно выпаяв её. Проверка производится прозвоном следующих контактов относительно земли (GND): V3.3, V5, V12, VCC, OPP. Если между одним из этих контактов и землей сопротивление крайне мало, 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.



Дроссель групповой стабилизации (ДГС)



Трансформаторы

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 визу-

ально. 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 выпаивания 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.

Контрольные вопросы

Практическая работа № 28.

Тема 5.1. Источники и приемники излучения.

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. $A = eU_k$.

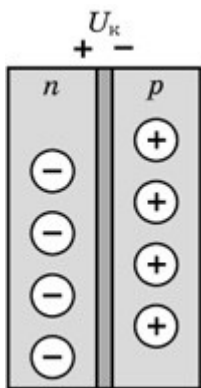


Рис. 114

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.

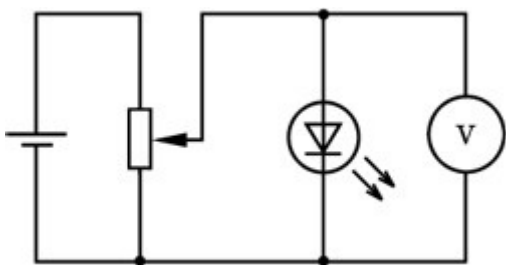


Рис. 115

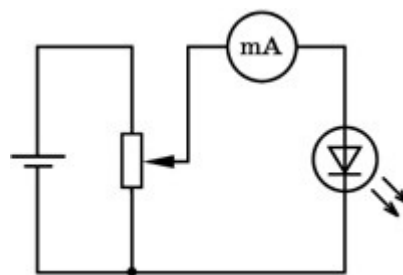


Рис. 116

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.

Контрольные вопросы

Практическая работа №29

Тема 5.1. Источники и приемники излучения.

Фоторезистор. Простейшее фотореле.

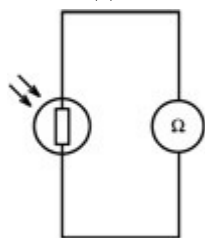
Цель работы: определить зависимость сопротивления фоторезистора от степени его освещенности, собрать и привести в действие простейшее фотореле.

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.

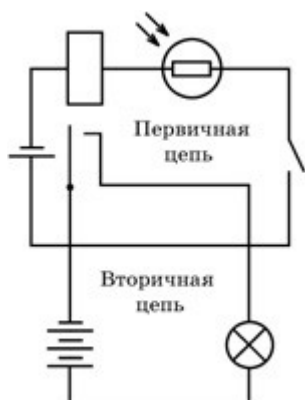


Рис. 86

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.

Контрольные вопросы

Практическая работа № 30.

Тема 5.2. Оптоэлектронные приборы и оптические линии связи

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.

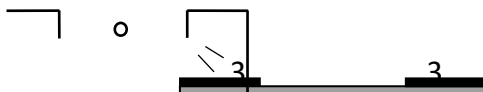
Внутренний фотоэффект – это изменение концентрации и подвижности носителей заряда в полупроводниках при их освещении. При внутреннем фотоэффекте, в отличие от внешнего, оптически возбужденные электроны остаются внутри освещенного тела, нейтральность которого не нарушается. Внутренний фотоэффект приводит 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.).

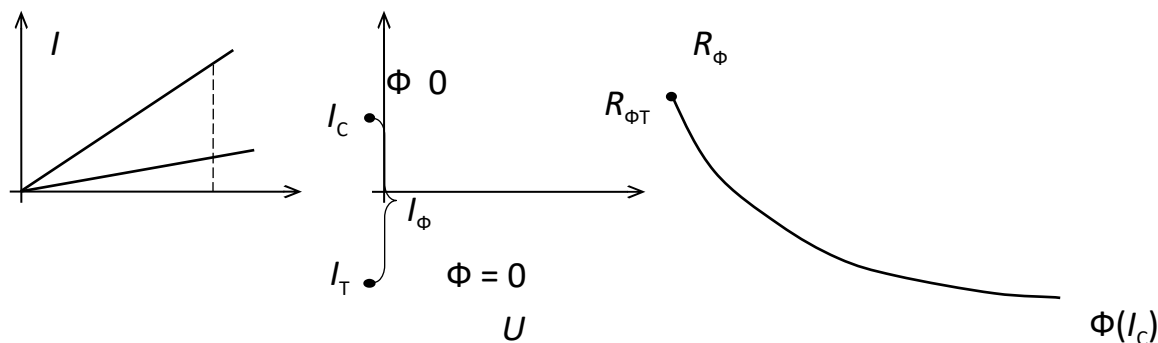
1.1. Фоторезистор

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).



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 полупроводник R_{Φ} появляется значительное количество дополнительных подвижных носителей заряда (пары электрон-дырка). Повышение концентрации свободных носителей заряда приводит к увеличению электропроводности вещества, следовательно сопротивление ФР R_{Φ} и то что 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.



а

б

Рис. 6.2. Характеристики фоторезистора

$$I_T = \frac{U}{R_{\Phi T}} \quad \text{и светового} \quad I_C = \frac{U}{R_{\Phi C}}$$

Фототок определяется как разность темнового

$$I_{\Phi} = I_C - I_T = U \left(\frac{1}{R_{\Phi C}} - \frac{1}{R_{\Phi T}} \right).$$

токов

Недостатками ФР являются:

- большая инерционность, которая составляет $1^{ны} - 10^{ки}$ мкс и зависит от световой предыстории;

- сильная температурная нестабильность;

- высокий уровень собственных шумов;

- нелинейность световой характеристики.

К достоинствам ФР относятся:

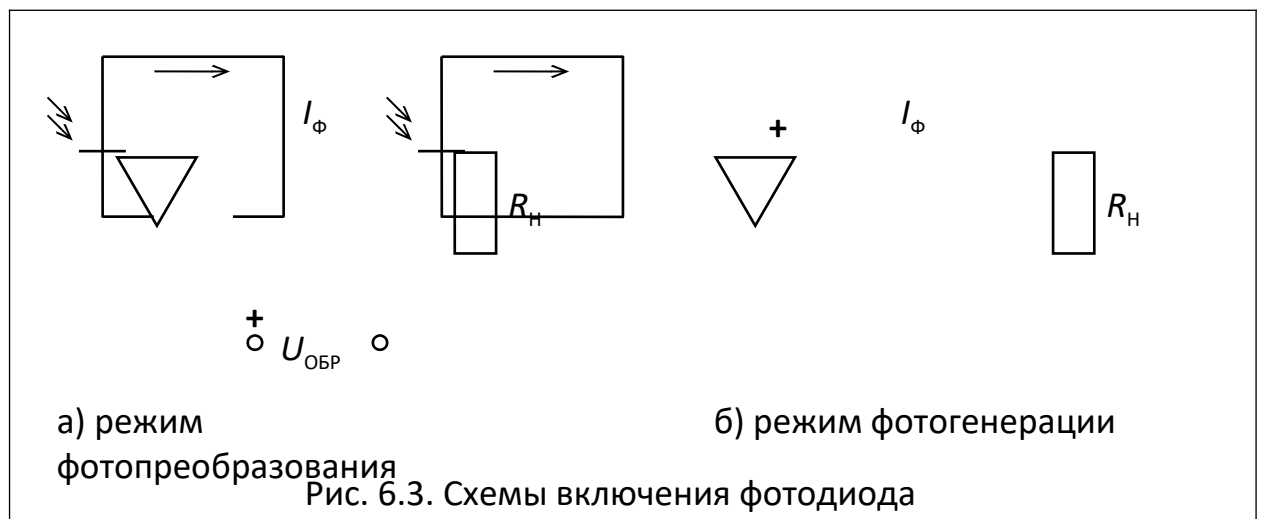
- высокая чувствительность к световому потоку ($S = dI_{\Phi}/d\Phi$ - спектральная чувствительность);

- 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).



Фотопреобразовательный режим характеризуется тем, что фотодиод работает со смещением, т.е. в цепь включен источник напряжения U_{OBR} 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_{OBR} .

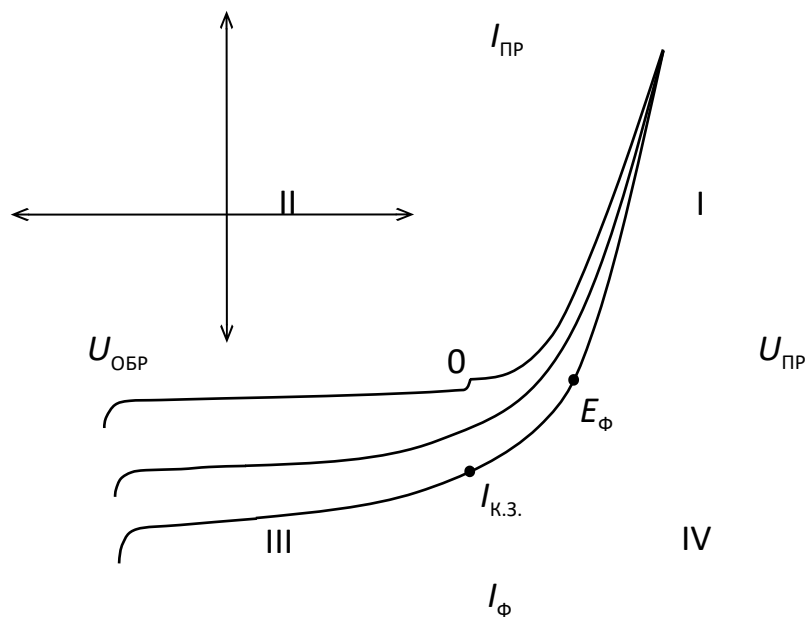
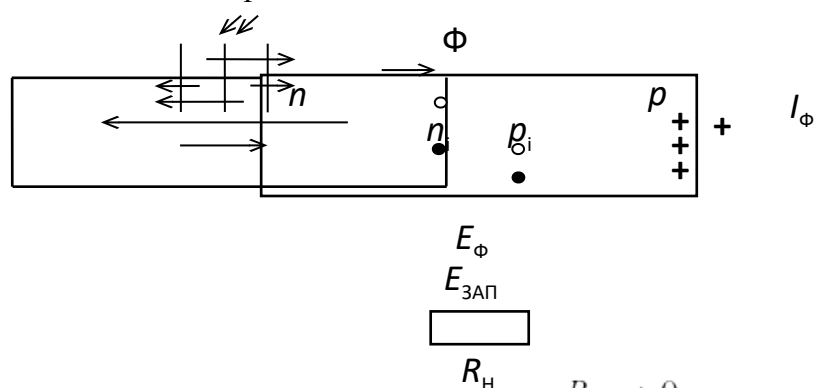


Рис. 6.4. ВАХ

В режиме фотогенерации фотодиода отсутствует внешний источник питания и сам фотодиод является источником фото-ЭДС E_{Φ} . Вольт-амперная 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 $E_{ЗАП}$ 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 $E_{ЗАП}$. Чем больше величина потока Φ , тем больше и значение E_{Φ} , а, следовательно, и фототок I_{Φ} .



При этом в режиме короткого замыкания при $R_H \rightarrow 0$ фототок равен току к.з.

$$I_{\Phi} = \frac{E_{\Phi}}{R_H + r} = \frac{E_{\Phi}}{r} = I_{\text{к.з.}}$$

В режиме холостого хода при $R_H \rightarrow \infty$ 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.

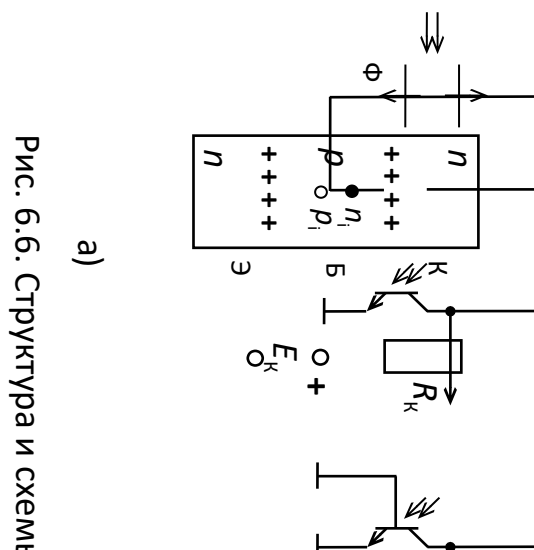
Основные параметры ФД:

- чувствительность $S = dI_{\Phi}/d\Phi$ составляет $10^{\text{ки}} \div 100^{\text{ни}}$ мА/лм;
- обратный темновой ток $I_0 = I_T$;
- ток короткого замыкания $I_{\text{к.з.}} = 10^{\text{ки}} \div 100^{\text{ни}}$ мА;
- инерционность составляет $1^{\text{цы}} \div 10^{\text{ки}}$ 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.



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 основными носителями в базе, свободно проходят в коллекторную область, увеличивая $I_{\text{к}}$ 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 $I_{\text{к}} = I_{\Phi}$, 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.

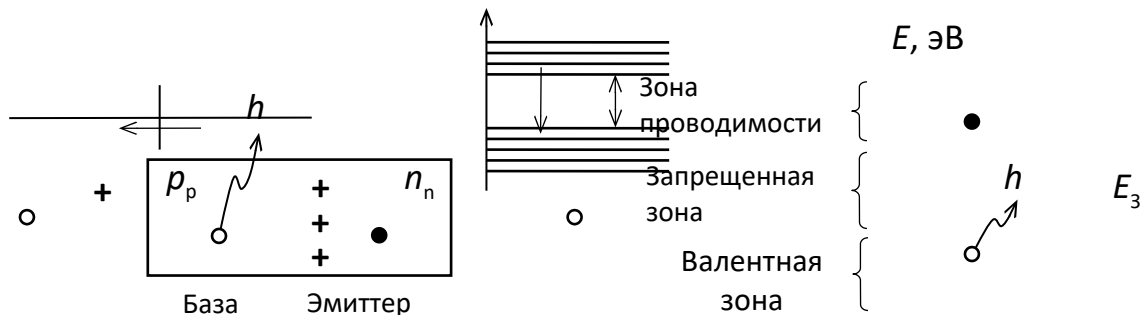


Рис. 6.7. Структура и принцип работы СИД

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 протяженной 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.

Вольт-амперная 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.

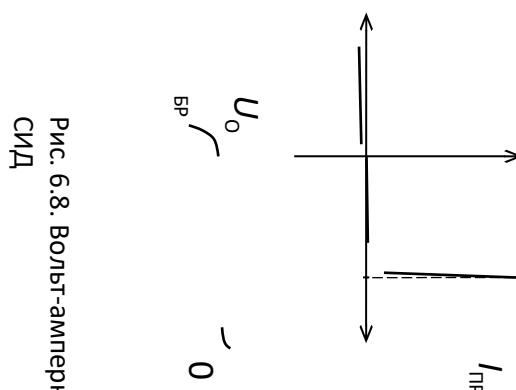


Рис. 6.8. Вольт-амперная характеристика СИД

Основные параметры СИД:

- цвет свечения (зависит от исходного материала);
- яркость свечения $B = f(I_{\text{ПР}})$;
- максимальный прямой ток $I_{\text{ПР.мах.доп}} = 10^{\text{ки}} \div 100^{\text{ни}}$ мА;
- номинальное прямое напряжение $U_{\text{ПР}} = 1,0 \div 2,5$ В;
- максимальное обратное напряжение $U_{\text{ОБР.мах.доп}} = 1^{\text{цв}} \div 10^{\text{ки}}$ 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

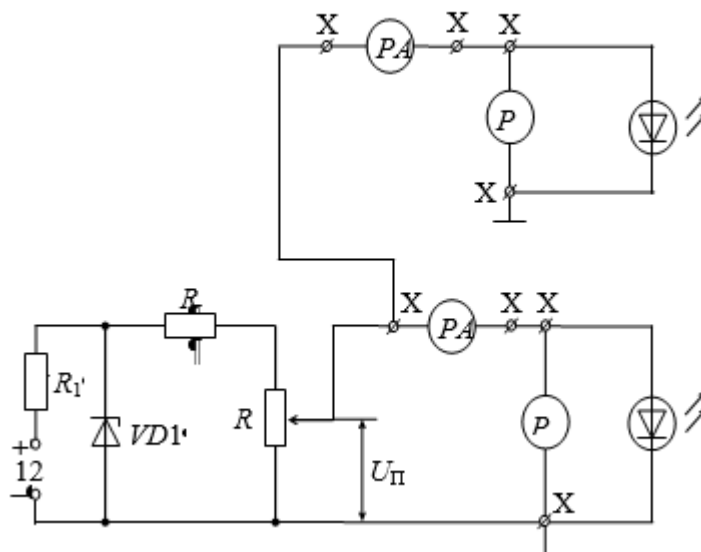
Оптрон или оптопара – это оптоэлектронный прибор, в котором конструктивно объединены источник и приемник излучения, связанные между собой оптическим каналом, например светодиод (источник излучения) и фототранзистор (приёмник излучения). Оптроны в основном используются для работы в импульсном режиме, 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

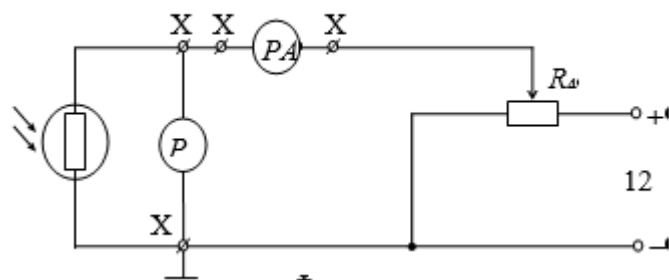
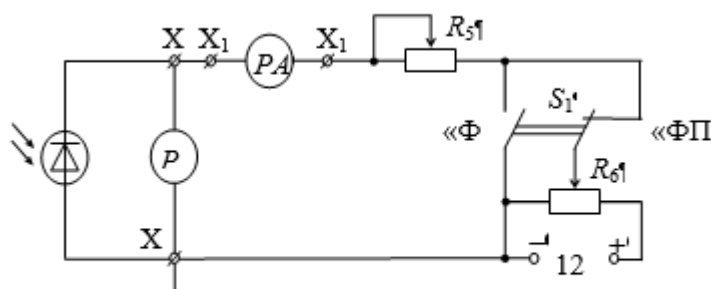


Фото резистор



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								
$U_{\text{пр}}, \text{В}$ 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 $I_{C\text{max}}$, 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	...	$I_{C\text{max}}$
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 $\Phi_2 \equiv k \cdot I_{C\text{max}}$;

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 $\Phi_2 = \Phi_{\text{max}} = k \cdot I_{C\text{max}}$ 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 S_1 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 крайне 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_0 .

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_0 , 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 $I_{\text{св}} = 20 \text{ мА}$ 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.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 5.1. Назовите основные характеристики фотоэлементов.
- 5.2. Какие ограничения по току и напряжению существуют для фотоэлементов?
- 5.3. Какой фотоэлемент допускает изменение полярности приложенного напряжения?
- 5.4. Что представляет собой оптопара или оптрон?
- 5.5. Укажите достоинства оптронов и области их применения.

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.