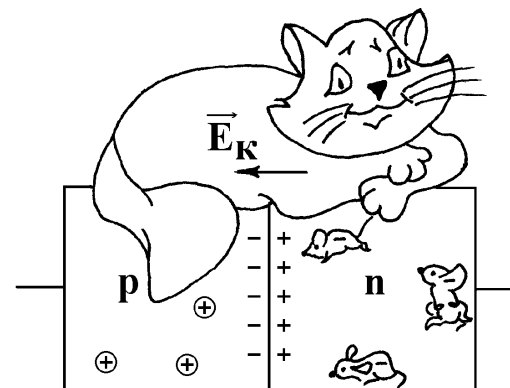


В.А. Иноземцев, С.В. Иноземцева

# Введение в электронику



Иноземцев В.А., Иноземцева С.В. Введение в электронику. -  
Брянск: Издательство БГПУ, 2001. - 150 с.

Пособие предназначено для помощи студентам в усвоении умений и навыков обращения с электро- и радиоизмерительными приборами. В нем рассмотрены вопросы, усвоение которых позволит будущим учителям ориентироваться среди различных электронных устройств, определять их параметры, выбирать режим их работы в соответствии с заданными требованиями. В учебном пособии подробно освещены правила электробезопасности, рассмотрены параметры резисторов, конденсаторов, транзисторов. В нем описана работа различных типов выпрямителей переменного тока, усилителей электрических колебаний на биполярных и полевых транзисторах, рассмотрено применение осциллографа для измерения параметров электрических сигналов.

Рецензенты:

Корнев Б.И., кандидат физико-математических наук,  
доцент БГПУ им. акад. И.Г. Петровского;  
Степанищева М.Н., кандидат физико-математических наук,  
доцент БГПУ им. акад. И.Г. Петровского.

Печатается по решению совета физико-математического факультета  
Брянского государственного педагогического университета  
имени академика И.Г. Петровского.

© Издательство БГПУ, 2001.

Содержание

Введение .....	5
Глава I. Правила техники безопасности при работе с электрическим током ....	8
Глава II. Электрические измерения физических величин .....	19
1. Общие сведения об измерениях .....	19
2. Погрешности измерений .....	21
3. Графическое представление результатов измерений .....	25
4. Характеристики средств измерений .....	25
5. Шкалы электроизмерительных приборов .....	26
6. Омметры .....	28
7. Делитель напряжения .....	30
8. Влияние электроизмерительных приборов на режим работы электрической цепи .....	33
9. Способы подключения электроизмерительных приборов (амперметр, вольтметр) к участку цепи в зависимости от его сопротивления .....	36
10. Изменение пределов измерения амперметра и вольтметра (расчет шунтов и добавочных резисторов) .....	38
11. Электронные осциллографы.....	40
12. Измерение с помощью осциллографа частоты сигнала, напряжения и сдвига фаз между двумя напряжениями.....	46
13. Получение вольт-амперной характеристики двухполюсника (резистора, диода, стабилитрона) на экране осциллографа .....	48
Глава III. Характеристики радиотехнических элементов и их измерение ...	52
1. Условные обозначения радиоэлементов на принципиальных схемах ...	52
2. Предохранители .....	54
3. Резисторы .....	57
4. Конденсаторы .....	62
5. Катушки индуктивности .....	70
6. Трансформаторы .....	72
7. Полупроводниковые диоды.....	75
8. Стабилитроны .....	78
9. Биполярные транзисторы .....	80
10. Полевые транзисторы.....	85
Глава IV. Источники электрического тока.....	88
1. Общие характеристики источников электрической энергии .....	88

2. Химические источники тока .....	89
3. Выпрямители .....	94
4. Стабилизаторы напряжения и тока.....	98
5. Импульсные блоки питания.....	102
<i>Глава V. Усилители электрических колебаний</i> .....	106
1. Классификация усилителей электрических колебаний.....	106
2. Обобщенная схема усилительного каскада.....	107
3. Режимы работы усилительных элементов.....	107
4. Параметры усилителей электрических колебаний низкой частоты.....	109
5. Усилители на биполярных транзисторах.....	112
6. Усилители на полевых транзисторах.....	116
7. Усилители на микросхемах.....	117
8. Особенности подключения антенных усилителей.....	118
<i>Глава VI. Монтаж и исследование радиотехнических устройств</i> .....	120
1. Особенности монтажа радиотехнических элементов .....	120
2. Монтаж и исследование двухполупериодного выпрямителя .....	122
3. Монтаж и исследование апериодического усилителя низкой частоты на биполярном транзисторе .....	124
<i>Приложение</i> .....	130
1. Источник электропитания ИЭПП-2.....	130
2. Выпрямитель В-24.....	133
3. Магазин сопротивлений РЗЗ.....	134
4. Осциллограф ОМЛ-3М.....	134
5. Осциллограф С1-134.....	137
6. Комбинированный прибор Щ4313.....	139
7. Милливольтметр ВЗ-38А.....	140
8. Авометр АВО-63.....	142
9. Звуковой генератор ГЗМ.....	145
10. Звуковые генераторы ГНЧШ, ГНЧШ-1.....	146
Литература .....	147

## ВВЕДЕНИЕ

Среди профессиональных умений учителя физики важное место занимают экспериментальные умения, в частности умения проводить электрические измерения и работать с радиотехническими устройствами. Формирование указанных умений происходит при изучении различных учебных дисциплин.

Предлагаемое учебное пособие может быть использовано на занятиях по радиоэлектронике, методике обучения физике, различного рода практикумах и курсах по выбору, а также для самообразования.

Ниже приведен примерный перечень **экспериментальных заданий**, которые могут выполняться на **практике по моделированию**. Количество заданий определяется преподавателем с учетом уровня подготовки студентов, их индивидуальных особенностей и отведенного на практику времени.

1. Определить ток срабатывания устройства защитного отключения.
2. Измерить с помощью авометра сопротивление между левой и правой рукой.
3. Проверить исправность предохранителя.
4. Проверить исправность и определить полярность выводов полупроводникового диода.
5. Проверить исправность и определить сигнальный провод коаксиального кабеля к электронному вольтметру, к электронному осциллографу.
6. Определить внутреннее сопротивление электроизмерительных приборов.
7. Измерить емкость конденсатора.
8. Измерить индуктивность катушки.
9. Определить структуру и выводы биполярного транзистора, проверить исправность р-п переходов.
10. Снять по точкам вольт-амперную характеристику резистора, полупроводникового диода, стабилитрона.
11. С помощью электронного осциллографа ОМЛ-3М измерить амплитуду и частоту переменного напряжения.
12. Сравнить осциллограммы прямоугольных импульсов напряжения на экранах двух осциллографов с существенно различающимися полосами пропускания каналов "У".
13. Получить вольт-амперную характеристику резистора, полупроводникового диода, стабилитрона на экране осциллографа.
14. Выполнить монтаж и проверить работоспособность двухполупериодного выпрямителя.
15. Снять зависимость постоянной и переменной составляющих выпрямленного напряжения от тока нагрузки.

16. Получить осциллограммы напряжения на выходе двухполупериодного выпрямителя с емкостным фильтром для трех существенно различающихся сопротивлений нагрузки.
17. Определить коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения с помощью электронного осциллографа.
18. Выполнить монтаж и проверить работоспособность апериодического усилителя на биполярном транзисторе, установив необходимую рабочую точку транзистора.
19. Снять амплитудную характеристику усилителя электрических колебаний низкой частоты.
20. Снять амплитудно-частотную характеристику усилителя.
21. Определить чувствительность усилителя низкой частоты при коэффициенте гармоник 5-7 %.
22. Определить входное сопротивление усилителя.
23. Определить выходное сопротивление усилителя.
24. Определить номинальную выходную мощность усилителя.
25. Проверить пригодность к эксплуатации гальванических элементов и малогабаритных аккумуляторов.

Примечание: Часть экспериментальных заданий выполняется в виде демонстраций, проводимых преподавателем и студентами.

**Перед началом практики по техническому моделированию студент должен знать ответы на следующие вопросы школьного курса физики:** электрический заряд, напряженность и потенциал электрического поля, разность потенциалов, напряжение, закон Ома для участка цепи, закон Ома для полной цепи, закон электромагнитной индукции Фарадея, принцип работы трансформатора, устройство и принцип действия р-п перехода, закон Ампера, принцип работы электроизмерительных приборов магнитоэлектрической системы, определение погрешностей измерений стрелочными измерительными приборами, емкость, индуктивность, емкостное и индуктивное сопротивление.

#### **Перечень теоретических вопросов к зачету по практике по техническому моделированию:**

1. Назначение защитного зануления.
2. Принцип действия устройства защитного отключения (по упрощенной схеме).
3. Условные обозначения радиоэлементов на принципиальных схемах (резистор, конденсатор, катушка индуктивности, биполярный транзистор, полевой транзистор, базовые логические элементы).
4. Последовательная и параллельная схемы омметра.

5. Делитель напряжения.
6. Два способа подключения амперметра и вольтметра к участку цепи в зависимости от сопротивления участка цепи.
7. Определение с помощью омметра, полупроводникового диода с маркированной полярностью и резистора сопротивлением 20 - 300 кОм структуры и выводов биполярного транзистора.
8. Методы измерения емкости конденсатора, индуктивности катушки и сопротивления резистора.
9. Структурная схема и принцип работы осциллографа.
10. Расчет резистора  $R_{эт}$  в схеме для наблюдения вольт-амперной характеристики полупроводникового диода на экране осциллографа.
11. Принцип работы двухполупериодного выпрямителя с емкостным фильтром, коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения.
12. Принцип работы устройства для зарядки малогабаритного аккумулятора и восстановления гальванических элементов.
13. Расчет погрешностей измерений измерительными приборами.

#### **Перечень обязательных теоретических вопросов к зачету:**

1. Принцип действия устройства защитного отключения (по упрощенной схеме).
2. Измерение емкости конденсатора, индуктивности катушки и сопротивления резистора методом амперметра-вольтметра.
3. Структурная схема и принцип работы осциллографа.
4. Принцип работы омметра.
5. Принцип работы двухполупериодного выпрямителя с емкостным фильтром, коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения.
6. Два способа подключения амперметра и вольтметра к участку цепи в зависимости от сопротивления участка цепи.
7. Делитель напряжения.
8. Расчет погрешностей измерений стрелочными и цифровыми измерительными приборами.

#### **Перечень обязательных экспериментальных заданий к зачету:**

1. Проверить исправность р-п переходов, определить структуру и выводы биполярного транзистора.
2. Проверить исправность полупроводникового диода и определить его выводы.
3. С помощью электронного осциллографа ОМЛ-3М измерить амплитуду и частоту переменного напряжения.
4. Проверить пригодность к эксплуатации гальванических элементов (или малогабаритных аккумуляторов).
5. Определить сигнальный провод коаксиального кабеля к электронному вольтметру, к электронному осциллографу.

## Глава I. ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ

Одними из важнейших профессиональных умений учителя выступают умения, связанные с обеспечением безопасной жизнедеятельности учащихся. Он должен сам знать правила техники безопасности и соблюдать их, а также сформировать у учащихся потребность в этом.

Рассмотрим основные правила безопасной работы с электрическим током.

*Действия электрического тока* на организм человека весьма разнообразны. Среди них выделяют:

- тепловое (термическое) действие, проявляющееся в нагреве и ожогах участков тела;
- электролитическое действие, проявляющееся в разложении крови и других органических жидкостей на составляющие элементы (может сопровождаться выделением пузырьков газа и закупоркой сосудов);
- биологическое (физиологическое) действие, проявляющееся в раздражении и возбуждении живых тканей организма, что сопровождается произвольными судорожными сокращениями мышц, в том числе мышц легких и мышцы сердца.

В результате этих действий возможны два вида поражений электрическим током: электрические травмы и электрические удары.

*Электрические травмы* - это четко выраженные местные повреждения тканей. Среди травм различают электрические ожоги, электрические знаки (четко очерченные пятна серого или бледного цвета на поверхности тела), металлизация кожи (проникновение в верхние слои кожи мельчайших частичек металла под действием электрической дуги), электроофтальмия (воспаление наружных оболочек глаз, возникшее в результате сильного воздействия ультрафиолетовых лучей) и механические повреждения.

*Электрический удар* - это результат биологического действия тока, состоящий в возбуждении живых тканей организма при прохождении через них электрического тока, сопровождающийся произвольными судорожными сокращениями мышц. Различают четыре степени электрических ударов в зависимости от исхода воздействия на организм, начиная от легкого, без потери сознания (первая степень) до клинической смерти (четвертая степень). В состоянии клинической смерти у человека отсутствует дыхание и сердцебиение, зрачки глаз расширены и не реагируют на свет. Длительность клинической смерти составляет примерно 4-8 минут. По истечении этого времени наступает гибель клеток головного мозга, приводящая к не-

обратимому прекращению биологических процессов в организме, распаду белковых структур - биологической смерти.

Причинами смерти от воздействия электрического тока могут быть прекращение работы сердца, прекращение дыхания и электрический шок. При этом следует помнить, что прекращение дыхания примерно через 2 минуты приводит к остановке сердца, и, наоборот, прекращение кровообращения также быстро приводит к прекращению дыхания. Наступает кислородное голодание организма и смерть.

Электрический шок - это тяжелая нервно-рефлекторная реакция организма, сопровождающаяся глубокими расстройствами кровообращения, дыхания, обмена веществ. Длится он, как правило, от десятков минут до суток.

*Степень поражения* человека при воздействии на него электрического тока зависит от нескольких причин: величины тока, проходящего через жизненно важные органы, рода и частоты тока, времени его действия, пути прохождения тока в теле человека и индивидуальных свойств человека.

Одними из основных факторов воздействия являются величина тока и длительность его протекания. Рассмотрим действие различных величин переменного тока промышленной частоты (50 Гц) на организм человека.

1. *Безопасным* считается ток, длительное прохождение которого через организм человека не причиняет ему вреда и не вызывает никаких ощущений. Его величина не превышает 50 мкА.
2. Ток величиной от 0,5 до 1,5 мА называется *пороговым ощущаемым* током. Он вызывает легкое покалывание, ощущение нагрева кожи.
3. При токе 2-5 мА появляется боль в руке, дрожание кисти.
4. Увеличение тока до 10-15 мА вызывает непереносимую боль и полное прекращение управления мышцами. Если человек просто прикоснулся к находящимся под напряжением участкам, он может освободиться от действия тока посредством отдергивания руки. Если же провод оказался зажатым в руке, то при этом значении тока человек не может по своей воле разжать пальцы от токоведущих частей и остается под напряжением. По этой причине ток величиной больше 10-15 мА называется *неотпускающим*.

Такое явление объясняется тем, что, если по мышцам, управляющим сгибанием и разгибанием пальцев руки, будет проходить ток одной и той же величины, то сгибательные мышцы, как более мощные, создают несколько большее усилие, поэтому пальцы сжимаются в кулак. При прохождении по руке тока промышленной частоты до 10-15 мА воздействие биологических импульсов по воле человека еще может создать в разгибательных мышцах большее усилие, чем в сгибательных, и пострадавший

может освободиться от действия электрического тока. При большем токе воздействие биологических импульсов на управление мышцами полностью утрачивается и их сокращение определяется только действием внешнего тока.

Пороговый неотпускающий ток условно можно считать безопасным для человека в том смысле, что он не вызывает немедленного поражения. Но при длительном прохождении величина тока растет за счет уменьшения сопротивления тела, в результате чего могут возникнуть нарушения кровообращения и дыхания и наступить смерть.

5. При токе величиной около 50 мА начинается судорожное сокращение мышц грудной клетки, сужение кровеносных сосудов и повышение артериального давления, что приводит к потере сознания и смерти.
6. При прохождении тока более 100 мА по пути рука - рука или рука - ноги через 1-2 секунды может наступить *фибриляция* сердца (хаотические, разрозненные сокращения отдельных волокон сердечной мышцы). В результате сердце перестает работать как насос, кровообращение нарушается. Фибрилляция продолжается и после прекращения действия тока, в результате наступает смерть.
7. При токе более 5 А фибрилляция, как правило, не наступает, а происходит немедленная остановка сердца. Хотя известно много случаев, когда при кратковременном прохождении через человека тока величиной около 10 А не наступала смерть. Однако в этом случае происходит паралич дыхания. При больших токах, проходящих через тело человека, смерть может наступить и в результате разрушения внутренней структуры тканей организма и глубоких ожогов тела.

При напряжениях до 250-300 В постоянный ток примерно в 4-5 раз безопаснее переменного с частотой 50 Гц, при более высоких напряжениях постоянный ток опаснее.

Величина проходящего через организм тока определяется приложенным напряжением и сопротивлением тела человека. *Сопротивление тела человека* при сухой, чистой и неповрежденной коже колеблется в пределах от 3000 до 500 000 Ом. Если удалить роговой слой в тех местах, где измеряется сопротивление, то его значение падает до 500-700 Ом. Состояние кожи сильно влияет на величину сопротивления тела человека. Наличие царапин, грязи и влаги очень сильно (в десятки раз) снижает сопротивление. Наименьшим сопротивлением обладает кожа лица, шеи, рук на участке выше ладоней и др. С увеличением тока и времени его прохождения сопротивление падает, поскольку при этом усиливается местный нагрев кожи, что приводит к увеличению потоотделения.

*Причинами несчастных случаев* при воздействии электрического тока могут быть:

- случайное прикосновение к токоведущим частям, находящимся под напряжением;
- появление напряжения на металлических частях электрооборудования, которые нормально не находятся под напряжением (вследствие нарушения изоляции, падения на них провода, находящегося под напряжением);
- возникновение шагового напряжения на участке земли, где находится человек.

Основными **мерами защиты** от поражения электрическим током являются:

- обеспечение недоступности для случайного прикосновения токоведущих частей, находящихся под напряжением;
- обеспечение надежной изоляции электроустановок;
- применение защитного заземления, зануления, отключения и др.;
- применение специальных защитных средств.

### **Первая помощь человеку, пораженному электрическим током**

Первую доврачебную помощь пораженному током должен уметь оказывать каждый работающий с электроустановками. Она состоит из двух этапов: освобождение пострадавшего от действия тока и оказание ему медицинской помощи.

Освобождение пострадавшего от действия тока необходимо в случае, если он сам не в состоянии этого сделать. Такое положение может возникнуть, если через пострадавшего проходит ток больше 10-15 мА и он не в состоянии разжать руку с зажатым проводом; при параличе или судорожном сокращении мышц; при потере сознания. Следует помнить, что ток, проходящий через человека, может быстро увеличиться до опасного значения, поэтому необходимо срочно освободить его от действия тока.

Такое освобождение можно осуществить несколькими способами. Наиболее простой - отключить электроустановку, которой касается человек, от источника питания. Если это сделать невозможно, то пострадавшего необходимо оттянуть от токоведущих частей или перерубить провода. При напряжениях до 1000 В допускается оттягивание пострадавшего, взявшись за его одежду и предварительно изолировав руки (диэлектрическими перчатками, шарфом, рукавицами и т.п.). Действовать необходимо одной рукой. Вместо этого можно изолировать себя от пола, встав на резиновый коврик, сухую доску или одежду. Перерубать провода при напряжениях до 1000 В можно топором с сухой деревянной ручкой или другим инструментом с изолированными ручками. Каждый

провод следует перерубать отдельно, чтобы не вызвать короткого замыкания и как следствия электрической дуги между проводами.

В электроустановках напряжением выше 1000 В для обеспечения собственной безопасности оказывающий помощь должен надеть диэлектрические перчатки и освобождение пострадавшего от токоведущих частей производить изолирующей штангой или клещами с изолирующими ручками, рассчитанными на соответствующее напряжение.

Сразу же после освобождения пострадавшего от электрического тока ему оказывается первая доврачебная помощь. Для определения ее вида и объема необходимо выяснить состояние пострадавшего (проверить наличие дыхания, пульса, реакцию зрачков на свет). Если пострадавший находится в сознании, у него нормальное дыхание и сердцебиение, то его все же нельзя считать здоровым. Его следует удобно уложить в сухое место, расстегнуть одежду и обеспечить полный покой до прибытия врача. Дело в том, что отрицательное воздействие электрического тока на человека может сказаться не сразу, а спустя некоторое время - через несколько минут, часов и даже дней.

Если пострадавший находится без сознания, но с нормальным дыханием и пульсом, его следует удобно уложить, обеспечить приток свежего воздуха и начать приводить в сознание (подносить к носу вату, смоченную в нашатырном спирте, обрызгивать лицо холодной водой, растирать и согревать тело).

В случае отсутствия у пострадавшего дыхания или (и) пульса ему необходимо производить искусственное дыхание и непрямой массаж сердца. Никогда не следует отказываться от оказания помощи пострадавшему и считать его мертвым из-за отсутствия дыхания, сердцебиения и других признаков жизни. Известно много случаев оживления людей, пораженных током, после нескольких часов, в течение которых *непрерывно* выполнялись искусственное дыхание и массаж сердца. Однако попытки оживления эффективны лишь когда с момента остановки сердца прошло не более 5-6 минут.

Длительное отсутствие пульса при появлении дыхания и других признаков оживления организма указывает на наличие фибрилляции сердца. В этом случае необходимо произвести его дефибрилляцию. Достигается она путем кратковременного воздействия большого тока на сердце пострадавшего. В результате происходит одновременное сокращение всех волокон сердечной мышцы, которые до того сокращались в разное время. После этого могут восстановиться естественные сокращения сердца. Дефибрилляция производится с помощью специального прибора – дефибриллятора, основ-

ной частью которого является конденсатор емкостью 20 мкФ с рабочим напряжением 6 кВ. Ток разрядки конденсатора при длительности 10 мкс составляет 15-20 А. Электрическую дефибрилляцию сердца может производить только врач.

### Техника безопасности при работе в лаборатории

Для усвоения учащимися правильных и безопасных приемов работы учитель обязан проводить инструктаж по соблюдению требований техники безопасности. Вводный инструктаж проводится со всеми учащимися при первом посещении кабинета, текущий - перед выполнением каждой лабораторной работы.

При работе в лаборатории с электрическим током необходимо соблюдать следующие правила:

1. Размещайте приборы и материалы на своем рабочем месте таким образом, чтобы исключить их падение или опрокидывание.
2. Запрещается нагружать измерительные приборы выше предельных значений, обозначенных на их шкалах.
3. Используйте провода с наконечниками и предохранительными изоляционными чехлами. Убедитесь, что их изоляция не имеет повреждений.
4. При сборке электрических цепей избегайте пересечения проводов.
5. Запрещается пользоваться выключателями с открытыми контактами при напряжениях выше 42 В.
6. При подключении установок к сети переменного тока напряжением 220 В необходимо использовать только штепсельные соединения.
7. Сборку и разборку, внесение изменений в цепь можно производить только при отключенном источнике питания. Источник электропитания подключается к собранной электрической цепи в последнюю очередь. *Собранную цепь можно включать только после проверки и с разрешения преподавателя или лаборанта.*
8. Не прикасайтесь к находящимся под напряжением элементам цепей, лишенным изоляции, к корпусам стационарного электрооборудования, к зажимам отключенных конденсаторов. Разряд конденсатора производить с помощью изолированного проводника.
9. Наличие напряжения в цепи проверяйте только с помощью приборов или указателей напряжения.
10. Обнаружив неисправность в электрических устройствах, необходимо немедленно отключить источник электропитания.
11. До включения электро- и радиоприборов в сеть необходимо убедиться в

соответствии положения переключателя сетевого напряжения его номинальной величине, а также в исправности предохранителей.

12. Присоединять однополюсную вилку (щуп) электроизмерительного прибора к цепи следует только одной рукой, причем вторая рука не должна касаться шасси, корпуса прибора и других электропроводящих предметов.
13. При настройке и регулировке включенного радиоустройства (подстройка контуров, регулировка переменных конденсаторов или резисторов) необходимо пользоваться инструментом с надежной изоляцией.
14. При эксплуатации осциллографов необходимо с особой осторожностью обращаться с электронно-лучевой трубкой. Недопустимы удары по трубке или попадание на нее расплавленного припоя, так как это может вызвать взрыв.
15. При появлении запаха гари, искрении, перегреве деталей следует немедленно отключить устройство от источника электропитания.
16. *Запрещается оставлять не выключенные электро- и радиоустройства без надзора и допускать к ним посторонних лиц.*

Учителю следует помнить, что учебные приборы, с которыми могут работать учащиеся, по способу защиты человека от поражения электрическим током должны удовлетворять требованиям II класса (иметь двойную или усиленную изоляцию) или III класса (присоединяться непосредственно к источникам питания напряжением не выше 42 В).

Рассмотрим более подробно основные способы защиты человека от поражения электрическим током, а именно, **применение защитного зануления и отключения**.

Для осуществления защитного зануления кроме нулевого рабочего провода используется нулевой защитный провод, который соединяют с корпусом электроустановки.

Основная функция защитного зануления - отключение поврежденного участка электрической цепи за счет перегорания предохранителей или срабатывания какой-либо другой защиты от перегрузки по току. Вторая функция защитного зануления (если вместо предохранителя вставлен "жучок" из толстого провода) - снижение напряжения, под которым в аварийной ситуации может оказаться человек.

Пусть, например, человек, стоящий в сырой обуви на электрически соединенном с землей полу, коснулся корпуса прибора (рис. 1.1 а). Из рисунка видно, что точки соединения с землей человека и вторичной обмотки трансформатора питания не совпадают (точки 31, 32). Эквивалентная схема такой ситуации приведена на рисунке 1.1б, где FU - предохранитель, R<sub>ф</sub> - сопротивление фаз-

ного провода, R<sub>н</sub> - сопротивление нагрузки (сопротивление прибора между клеммами шнура питания), R<sub>0</sub> - сопротивление рабочего нулевого провода, Z<sub>из</sub>

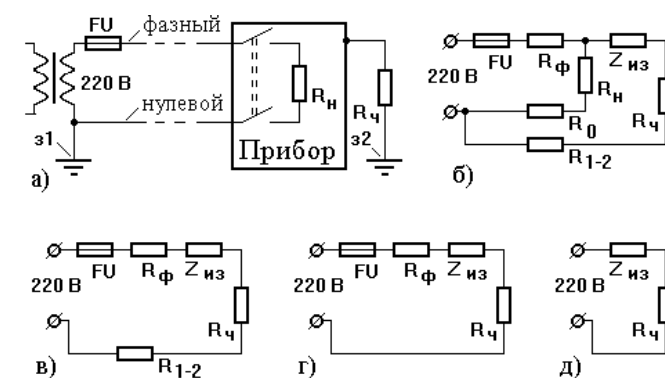


Рис. 1.1

рабочего провода составляет обычно десятые доли ома. Сопротивление Z<sub>из</sub> в основном определяется емкостной связью между первичной обмоткой трансформатора и магнитопроводом. Для источников питания и осциллографов, используемых в лаборатории, полное сопротивление изоляции составляет десятки мегаом.

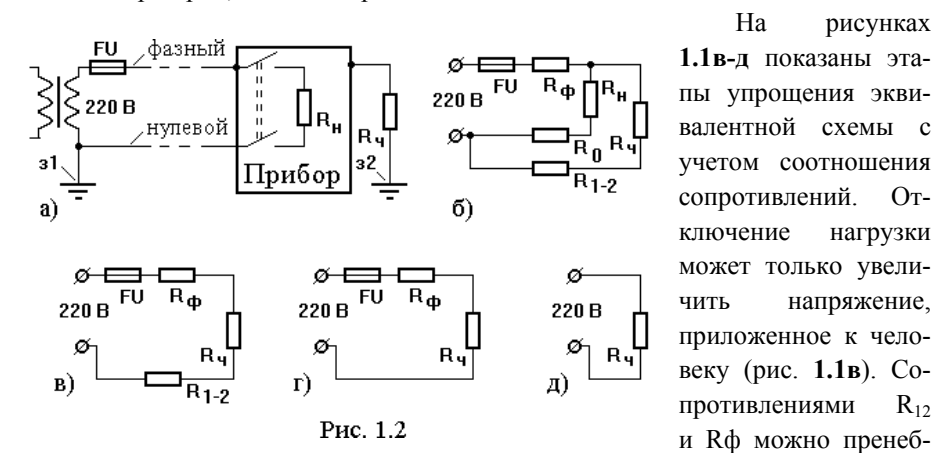


Рис. 1.2

речь по сравнению с сопротивлением Z<sub>из</sub> (рис. 1.1г; 1.1д).

Таким образом, при самых неблагоприятных условиях (поранена кожа человека) через человека может протекать ток не более 20 мкА, а протекание такого тока человек не ощущает. Рассмотрим следующую аварийную ситуацию. Фазный провод соединился с корпусом прибора, а за корпус прибора взялся человек, стоящий на сыром полу или на соединенных с

- полное сопротивление изоляции между одним из проводов шнура питания и корпусом прибора, R<sub>ч</sub> - сопротивление человека, R<sub>1-2</sub> - сопротивление заземления между точками 31 и 32.

Сопротивление фазного и нулевого

На рисунках 1.1в-д показаны этапы упрощения эквивалентной схемы с учетом соотношения сопротивлений. Отключение нагрузки может только увеличить напряжение, приложенное к человеку (рис. 1.1в). Сопротивлениями R<sub>12</sub> и R<sub>ф</sub> можно пренеб-

землей металлических предметах (рис. **1.2а**). Корпус прибора пока с нулевым проводом не соединен. Эквивалентная схема этой ситуации представлена на рисунке **1.2б**. Анализируя схемы на рисунках **1.2в-д**, можно показать, что к человеку в этом случае будет приложено практически все напряжение 220 В.

Если корпус прибора соединен с нулевым защитным проводом (рис. 1.3а), то получается короткое замыкание. Эквивалентная схема приведена на рисунке 1.3б, где  $R_{02}$  - сопротивление нулевого защитного провода. Сопротивление защитного нулевого провода должно быть не более 0,1 Ом. Ток короткого за-

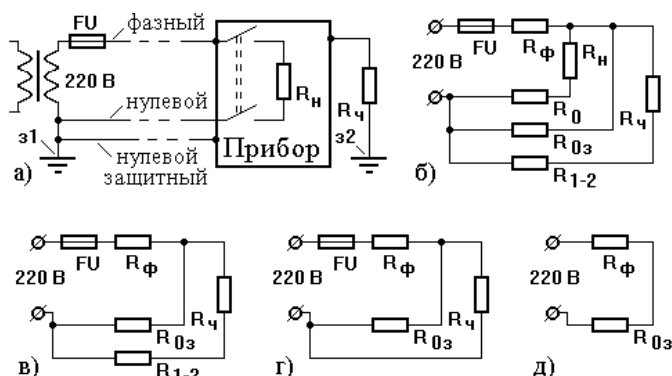


Рис. 1.3

ставленный вместо предохранителя “жучок” не перегорит, то напряжение, под которым окажется человек, будет меньше 220 В, так как сопротивление нулевого защитного провода выбирается меньше сопротивления фазного (показать самостоятельно для сопротивления нулевого защитного провода 0,1 Ом, сопротивления фазного провода 0,4 Ом).

В школьных кабинетах физики широко используются **устройства защитного отключения УЗО**, уменьшающие вероятность поражения электрическим током человека в аварийных ситуациях.

Принцип работы устройства защитного отключения рассмотрим по упрощенной схеме (рис. 1.4). При нажатии на кнопку S1 (пуск) начинает протекать ток по цепи: фазный провод, замкнувшиеся контакты кнопки S1, нормально замкнутые контакты кнопки S2 (стоп), блок питания усилителя, нулевой провод; в результате чего срабатывает реле K2 и замыкаются контакты K2.1. После замыкания контактов K2.1 начинает протекать ток по цепи: фазный провод, замкнувшиеся контакты кнопки S1, нормально замкнутые контакты кнопки “стоп”, контакты K2.1, обмотка реле K1, нулевой провод, в результате чего замыкаются контакты K1.1, K1.2, K1.3. Тогда через нагрузку протекает ток по

следующей цепи: фазный провод, замкнутый контакт К1.1, обмотка II трансформатора Тр1, резистор нагрузки, обмотка I трансформатора Тр1, контакт К1.2, нулевой провод. Контакты К1.3 блокируют кнопку S1 и нагрузка остается подключенной после отпускания кнопки пуск.

Обмотки I и II трансформатора Тр1 имеют одинаковое число витков толстого провода (обычно 3-5 витков), а обмотка III имеет большое число витков

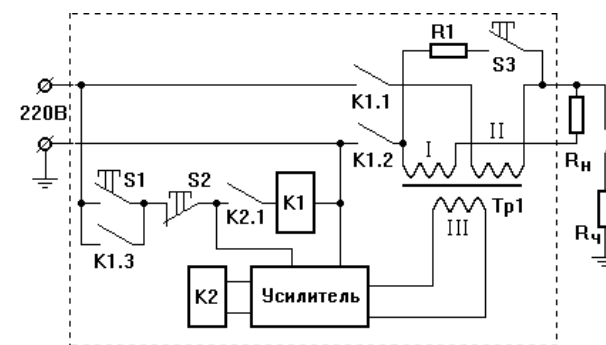


Рис. 1.4

тонкого провода. Трансформатор подключается так, что при одинаковых токах через обмотки I и II ЭДС в обмотке III не наводится. Если токи, протекающие через обмотки I и II трансформатора, отличаются более чем на 10 мА, то в обмотке III наводится ЭДС, достаточная для размыка-

ния контактов К2.1. В этом случае ток через обмотку реле К1 прекращается и размыкаются контакты К1.1 и К1.2, отключая нагрузку от сети. Таким образом, если через человека, коснувшегося одновременно фазного провода и какого-либо заземленного предмета, пойдет ток более 10 мА, то устройство защитного отключения отключит нагрузку от сети. Работоспособность устройства можно проверить, нажав на кнопку S3: если при этом нагрузка отключится от сети, то устройство исправно.

По окончании работы рекомендуется отключать нагрузку от сети нажатием на кнопку S3 (контроль). Если при нажатии на кнопку “контроль” устройство не отключается от сети, значит оно неисправно. В этом случае для отключения устройства необходимо нажать на кнопку “стоп”.

Устройство защитного отключения является дополнительной мерой защиты и его использование ни в коей мере не позволяет отказаться от соблюдения стандартных правил техники электробезопасности.

Устройство защитного отключения УЗОШ.10.2.010УХЛ4, входящее в комплект электроснабжения школьного кабинета физики, имеет следующие основные *характеристики*:

- питающее напряжение - 220 В,
- номинальный рабочий ток - 10 А,

- номинальное значение тока срабатывания при замыкании на землю - 0,01 А,
- время срабатывания при удвоенном значении тока срабатывания 0,02 А - не более 0,05 с.

Для использования в быту выпускается устройство защитного отключения УЗО.10.2.010.11.УХЛ12, которое имеет такие же характеристики.

Значение тока срабатывания устройства защитного отключения можно легко определить экспериментально. Для этого сначала необходимо убедиться в работоспособности устройства, нажав на кнопку “контроль”. Если

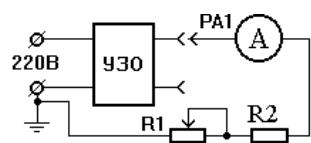


Рис. 1.5

устройство исправно, то нагрузка отключится от сети. Затем собирают электрическую цепь (рис. 1.5), содержащую последовательно соединенные миллиамперметр переменного тока с пределом измерения 15-20 мА, постоянный резистор R2 сопротивлением 15 кОм, мощно-

стью рассеяния 2 Вт и переменный резистор R1 сопротивлением 10 кОм, мощностью рассеяния 1 Вт. Один конец этой цепи подключается к защитному нулевому проводу (к металлическому корпусу электrorаспределительного щита), а второй конец – в одно из гнезд розетки на выходе устройства защитного отключения. Уменьшая сопротивление переменного резистора, фиксируют значение тока, при котором устройство защитного отключения отключит нагрузку. Если отключение нагрузки не произошло, то неправильно выбрано гнездо розетки.

В случае отсутствия амперметра ток утечки на землю можно рассчитать. Для этого используют ту же схему, но без амперметра, а в качестве резистора R1 используют магазин сопротивлений (например, Р 33). Уменьшая сопротивление магазина сопротивлений, определяют общее сопротивление цепи, при котором произойдет отключение устройства. Ток утечки рассчитывают из закона Ома. Если полученное таким образом значение тока окажется меньше приведенного в паспорте устройства, то устройство исправно.

## Глава 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

### 2.1. Общие сведения об измерениях

В физике для описания явлений, процессов и свойств тел или систем используются количественные характеристики – физические величины. Значения физических величин получают в ходе их **измерения** с помощью специальных технических средств. Измерить физическую величину – значит сравнить ее с однородной величиной, принятой за единицу. В результате получают числовое значение физической величины в принятых единицах.

Единицы измерения не являются объектами природы, а представляют лишь вспомогательный аппарат, применяемый для ее изучения. Поэтому в принципе возможно бесконечное множество единиц измерения. Но на практике удобно пользоваться единой системой единиц.

В СССР в 1963 г. была введена Международная система единиц СИ. В качестве основных в этой системе используются семь единиц, через которые выражаются остальные единицы, именуемые производными. Основными в системе СИ выбраны единицы следующих физических величин: массы - килограмм (кг); длины - метр (м); времени - секунда (с); силы тока - ампер (А); термодинамической температуры - кельвин (К); силы света - кандела (кд); количества вещества - моль (моль).

Для проведения измерений используются специальные технические средства, которые по назначению разделяются на меры, измерительные приборы, измерительные преобразователи и вспомогательные средства. Совокупность различных средств измерений может образовывать измерительные установки и системы.

**Мерой** называется средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера; это вещественно воспроизведенная (изготовленная) единица измерения. Различают однозначные меры, многозначные меры и наборы мер. *Однозначная мера* воспроизводит физическую величину одного размера (например, конденсатор постоянной емкости, гиря). *Многозначная мера* воспроизводит ряд значений одноименных физических величин различного размера (конденсатор переменной емкости, вариометр индуктивности, линейка с миллиметровыми делениями и т.п.). *Набор мер* представляет собой специально подобранный комплект мер для воспроизведения ряда значений одноименных величин различного размера, причем меры могут применяться как отдельно, так и в различных сочетаниях (магазины сопротивлений, емкостей, набор гирь). Магазин мер – это набор мер, конструктивно объединенных в одно целое.

**Измерительные приборы** позволяют получить информацию о значениях измеряемой величины в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем. Они могут быть классифицированы по различным признакам. В частности, измерительные приборы подразделяются на **аналоговые**, показания которых являются непрерывной функцией измеряемой величины, и **цифровые**, которые автоматически вырабатывают дискретные сигналы измерительной информации и дают показания в цифровой форме.

В состав многих измерительных приборов и установок входят **измерительные преобразователи**, предназначенные для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем. Примером являются терморезисторы, делители напряжения, измерительные механизмы электромеханических приборов и др.

**Измерительная установка** представляет совокупность функционально объединенных средств измерений (мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей) и вспомогательных устройств. Она предназначена для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для непосредственного восприятия наблюдателем, и расположена в одном месте.

Совокупность средств измерений и вспомогательных устройств, соединенных между собой каналами связи, называется **измерительной системой**.

Все измерения физических величин подразделяются на прямые, косвенные, совокупные и совместные.

**Прямое измерение** – это определение значения измеряемой величины непосредственно с помощью средств измерения. Так можно найти массу тела с помощью весов, измерить силу тока амперметром и др.

При **косвенных измерениях** значение физической величины определяется по формуле, связывающей ее с другими величинами, полученными в ходе прямых измерений. Например, так измеряется плотность тел по массе и объему, сопротивление по силе тока и напряжению и т.д.

При **совокупных измерениях** одновременно измеряют несколько однородных величин, а их искомые значения находят решением системы уравнений, получаемых при прямых измерениях различных сочетаний этих величин.

**Совместные измерения** состоят в одновременном измерении двух или нескольких не одноименных величин для нахождения зависимости между ними.

Измерения могут проводиться методом непосредственной оценки или сравнения с мерой.

## 2.2. Погрешности измерений

Ни одно измерение не выполняется идеально точно, всегда по различным причинам существует **погрешность**, т.е. отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины. Причиной погрешности может стать несовершенство методики измерения, используемых средств измерений, органов чувств человека-оператора, а также влияние внешних условий.

Все погрешности, не связанные с грубыми ошибками (промахами, возникающими вследствие недосмотра экспериментатора или неисправности аппаратуры), имеют случайную и систематическую составляющие. **Случайные погрешности** изменяют величину и знак при повторных измерениях одной и той же величины. Значение случайной погрешности измерения невозможно предвидеть и, следовательно, исключить. Для уменьшения их влияния проводят несколько измерений величины и берут среднее арифметическое из полученных значений.

**Систематические** погрешности остаются постоянными по величине и знаку или закономерно изменяются при повторных измерениях одной и той же величины. Систематические погрешности разделяются на методические (несовершенство метода измерений; в том числе влияние средств измерения на объект, свойство которого измеряется), инструментальные (зависящие от погрешности применяемых средств измерений), внешние (обусловленные влиянием условий проведения измерений) и субъективные (обусловленные индивидуальными особенностями оператора).

Различают абсолютную и относительную погрешность измерения.

Под **абсолютной погрешностью** измерения понимают разность между полученным в ходе измерения и истинным значением физической величины:

$$\Delta x = x_{\text{изм}} - x_{\text{ист}} \quad (2.1)$$

Без сравнения с измеряемой величиной абсолютная погрешность ничего не говорит о качестве измерения. Одна и та же погрешность в 1 мм при измерении длины комнаты не играет роли, при измерении длины тетради уже может быть существенна, а при измерении диаметра проволоки совершенно недопустима.

Поэтому вводят относительную погрешность, показывающую, какую часть абсолютная погрешность составляет от истинного значения измеряемой величины. **Относительная погрешность** представляет собой отношение абсолютной погрешности к истинному значению измеряемой величины:

$$\delta = \frac{\Delta x}{x_{\text{ист}}} 100\% \quad (2.2)$$

Относительная погрешность обычно выражается в процентах.

Результат измерения величины принято записывать в виде:

$$x_{\text{изм}} \pm \Delta x, \quad \delta = \dots \%$$

При записи абсолютной погрешности ее величину округляют до двух значащих цифр, если первая из них является единицей, и до одной значащей цифры во всех остальных случаях. При записи измеренного значения величины последней должна указываться цифра того десятичного разряда, который использован при указании погрешности.

Из формул (2.1) и (2.2) следует, что для нахождения погрешностей измерений необходимо знать истинное значение измеряемой величины. Поэтому этими формулами можно пользоваться только в тех редких случаях, когда проводятся измерения констант, значения которых заранее известны. Цель же измерений, как правило, состоит в том, чтобы найти не известное значение физической величины. Поэтому на практике погрешности измерений не вычисляются, а оцениваются.

В частности, относительную погрешность находят как отношение абсолютной погрешности не к истинному, а к измеренному значению величины:

$$\delta = \frac{\Delta x}{x_{\text{изм}}} 100\% \quad (2.3)$$

Способы оценки абсолютной погрешности разные для прямых и косвенных измерений.

Максимальную абсолютную погрешность при прямых измерениях находят как сумму абсолютной инструментальной погрешности и абсолютной погрешности отсчета:

$$\Delta x = \Delta x_{\text{приб}} + \Delta x_{\text{отсч}} \quad (2.4)$$

Погрешность отсчета является случайной и устраняется при многократных измерениях. Если же проводится одно измерение, она обычно принимается равной половине цены деления шкалы измерительного прибора.

Обратимся теперь к анализу **погрешностей средств измерения**. В зависимости от условий применения средств измерения различают основную и дополнительную погрешности. *Основная погрешность* – это погрешность средств измерений, используемых при нормальных условиях; *дополнительная погрешность* – это погрешность средств измерений, возникающая в результате отклонения значения одной или более влияющих величин от нормального значения.

Способ задания пределов допускаемой основной абсолютной погрешности измерительных средств определяется зависимостью погрешности от значения измеряемой величины. Если абсолютная погрешность измерительного прибора не зависит от измеряемой величины, то погрешность называется **аддитивной** и ее предел может быть выражен одним числом:

$$\Delta x_{\text{макс приб}} = \pm a \quad (2.5)$$

Зона погрешности в этом случае ограничена двумя прямыми линиями, параллельными оси абсцисс (рис.2.1а). Источники аддитивной погрешности – трение в опорах, неточность отсчета, дрейф, наводки, вибрации и другие факторы. От этой погрешности зависит наименьшее значение величины, которое может быть измерено прибором.

Если погрешность прибора зависит от измеряемой величины, то она называется **мультипликативной** и предел допускаемой абсолютной погрешности выражается формулой  $\Delta x_{\text{макс приб}} = \pm (a + bx)$ ,

$$(2.6)$$

где  $b$  – постоянная величина,  $bx$  – предельное значение мультипликативной погрешности,  $a$  – предельное значение аддитивной погрешности.

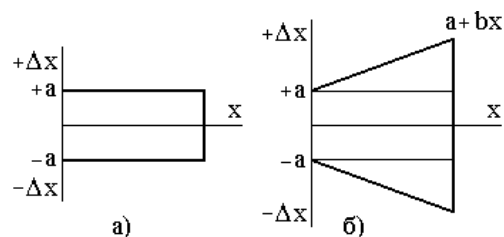


Рис. 2.1

Таким образом, мультипликативная погрешность прямо пропорциональна значению измеряемой величины  $x$ . Источники мультипликативной погрешности – действие влияющих величин на параметры элементов и узлов средств измерений. Зона погрешности при наличии аддитивной и мультипликативной составляющей показана на рисунке 2.1 б.

Инструментальная погрешность электроизмерительных приборов определяется их классом точности. **Класс точности** (максимальная приведенная погрешность) – это отношение максимальной абсолютной погрешности прибора к пределу измерения величины (полному значению шкалы). Его, как и относительную погрешность, выражают в процентах. Класс точности показывает, сколько процентов максимальная инструментальная погрешность составляет от всей шкалы прибора:

$$\gamma = \frac{\Delta x_{\text{приб. макс.}}}{x_{\text{макс.}}} 100\% \quad (2.7)$$

ГОСТом установлено 8 классов точности измерительных приборов: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Зная класс точности прибора и предельное значение измеряемой величины, можно определить абсолютную и относительную инструментальную погрешность измерения:

$$\Delta x_{\text{приб. макс.}} = \frac{x_{\text{макс.}} \gamma}{100\%} \quad (2.8)$$

$$\delta = \frac{\Delta x_{\text{приб. макс.}}}{x_{\text{изм}}} 100\% = \frac{x_{\text{макс.}} \gamma}{x_{\text{изм}}} \quad (2.9)$$

Из формулы (2.9) видно, что чем ближе значение измеряемой величины к пределу измерения, тем меньше относительная инструментальная погрешность.

У приборов, аддитивная составляющая погрешности которых преобладает над мультипликативной, класс точности выражается одним числом. К таким приборам относится большинство аналоговых стрелочных приборов. Относительная инструментальная погрешность в этом случае находится просто по формуле (2.9).

Класс точности средств измерения, у которых аддитивная и мультипликативная составляющие основной погрешности соизмеримы, обозначается двумя числами, разделенными косой чертой:  $c/d$ . Причем класс точности должен удовлетворять условию  $c/d > 1$ . К приборам, класс точности которых выражается дробью, относятся цифровые показывающие приборы. Их максимальная относительная погрешность определяется по формуле:

$$\delta = c + d \left( \frac{x_{\text{макс}}}{x_{\text{изм}}} - 1 \right) \quad (2.10)$$

Таблица "Расчет погрешностей"

$f = \sin x$	$\delta_f = \operatorname{ctgx} \cdot \Delta x$
$f = x \pm y$	$\delta_f = \frac{\Delta x + \Delta y}{x \pm y}$
$f = \frac{1}{x} + \frac{1}{y}$	$\delta_f = \frac{\Delta x / x^2 + \Delta y / y^2}{1/x + 1/y}$
$f = x \cdot y$	$\delta_f = \delta_x + \delta_y$
$f = x^n$	$\delta_f = n \cdot \delta_x$
$f = \frac{x}{y}$	$\delta_f = \delta_x + \delta_y$
$f = \sqrt[n]{x}$	$\delta_f = \frac{1}{n} \cdot \delta_x$

Для *прямых измерений* сначала оценивается абсолютная погрешность, а затем относительная. При оценке погрешности *косвенных измерений* величины поступают следующим образом. Сначала находят абсолютные погрешности величин, полученных в ходе прямых измерений. Затем вычисляют относительную погрешность исследуемой величины, пользуясь для этого одной из формул, приведенных в таблице "расчет погрешностей". Формула относительной погрешности зависит от того, по какой формуле находят значение измеряемой

Для сравнения погрешностей измерения цифровых и стрелочных измерительных приборов постройте самостоятельно график зависимости относительной погрешности измерения постоянного напряжения от его величины приборами АВО-63 и Ц4313 на пределе 2В.

Класс точности или максимальная инструментальная погрешность приборов обычно приводится в его паспорте. Для менее точных приборов, если в паспорте ничего не указано, максимальная инструментальная погрешность принимается равной половине цены или цене деления шкалы.

величины. И только после этого находят абсолютную погрешность измеряемой величины, выражая ее из формулы (2.3).

### 2.3. Графическое представление результатов измерений

Достаточно часто измерения физических величин проводятся для установления зависимости между ними. В этом случае результаты экспериментов представляют в графической форме. Для построения графиков используют

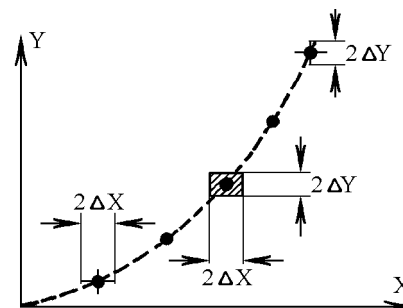


Рис. 2.2

миллиметровую бумагу или, в крайнем случае, бумагу в клеточку. При этом масштаб выбирают так, чтобы экспериментальные точки располагались по всей площади графика. Точки, полученные при разных условиях (например, при увеличении и уменьшении нагрузки) удобно наносить разными цветами и значками. Если к моменту построения графика погрешности измерений определены, то экспериментальные данные лучше наносить не в виде точек, а в виде

прямоугольников или крестов. Сторона такого прямоугольника равна удвоенной абсолютной погрешности измерения величины (рис. 2.2). Если погрешность одной величины слишком мала, то результаты изображаются на графике просто черточками, вытянутыми в том направлении, где погрешность измерения больше.

После нанесения точек на график через них проводят самую простую кривую так, чтобы на каждом достаточно большом ее участке точки располагались как выше, так и ниже кривой.

### 2.4. Характеристики средств измерений

Кроме погрешности важной характеристикой средств измерений является их чувствительность. **Чувствительность прибора** к измеряемой величине – это отношение изменения сигнала на выходе измерительного прибора к вызывающему его изменению измеряемой величины. Величина, обратная чувствительности, называется постоянной прибора или ценой деления.

От чувствительности необходимо отличать понятие **порога чувствительности** измерительного прибора, под которым понимают наименьшее изменение значения измеряемой величины, вызывающее заметное изменение показаний прибора.

**Потребляемая мощность** – это мощность, потребляемая электроизмерительным прибором при включении его в измерительную цепь. В большинстве случаев эта мощность мала с точки зрения экономии электроэнергии. Но при измерении в маломощных цепях потребление приборами мощности может изменить режим работы цепи, что приводит к погрешностям измерений (см. п. 2.8). Поэтому малое потребление мощности от цепи, в которой осуществляется измерение, является достоинством прибора. Мощность, потребляемая приборами, в зависимости от принципа действия, назначения прибора и предела измерения, имеет самые различные значения и для большинства приборов лежит в пределах  $10^{-12}$  – 15 Вт.

**Быстродействие** – число измерений, выполняемых в единицу времени.

**Время установления показаний** (время успокоения) – это промежуток времени, который проходит с момента изменения измеряемой величины до момента, когда указатель займет положение, соответствующее новому значению измеряемой величины. Обычно этот интервал рассматривают до момента, когда отклонение указателя от установившегося значения не превышает 1% длины шкалы. Время установления показаний для большинства типов приборов не должно превышать 4 с.

**Диапазон измерения** – область значений между верхним и нижним пределами измерений. Диапазон измерений может состоять из нескольких частей (поддиапазонов), для каждой из которых могут быть разные классы точности.

**Перегрузочная способность** – это возможность прибора сохранять работоспособность при кратковременном повышении токов или напряжений сверх установленных величин.

Кроме названных характеристик электроизмерительные приборы могут быть *классифицированы* по ряду признаков: назначение, условия эксплуатации, защищенность от внешних магнитных или электрических полей, устойчивость к механическим воздействиям, класс точности, принцип действия и др.

## 2.5. Шкалы электроизмерительных приборов

У стрелочных измерительных приборов имеются шкалы, которые могут быть **именованными**, т.е. градуированными в единицах измеряемых величин, или **условными**. Условные шкалы применяют в многопредельных приборах. Чтобы узнать численное значение измеряемой величины по прибору с условной шкалой, надо цену деления шкалы умножить на число делений, отсчитанных по этой шкале до того места, где остановилась стрелка. Напомним, что для нахождения **цены деления** нужно найти разность между значениями ближайших "оцифрованных" делений и разделить на число делений между ними.

Шкалы приборов бывают **нулевые** и **безнулевые**. Нулевые шкалы могут быть **односторонними** (нуль размещен в начале шкалы) или **двухсторонними** (нуль размещен между начальной и конечной отметками). В зависимости от положения нуля между конечными отметками двухсторонние шкалы бывают симметричными и несимметричными. На безнулевых шкалах конечные отметки соответствуют нижнему и верхнему пределам измерения.

Условные обозначения на шкалах электроизмерительных приборов

магнитоэлектрический прибор с подвижной рамкой		горизонтальное положение шкалы	
магнитоэлектрический прибор с подвижным магнитом		вертикальное положение шкалы	
электромагнитный прибор		наклонное положение шкалы под определенным углом к горизонту, например 60°	
электродинамический прибор		направление ориентировки прибора в земном магнитном поле	
ферродинамический прибор		класс точности при нормировании погрешности в процентах от диапазона измерения	2
индукционный прибор		класс точности при нормировании погрешности в процентах от длины шкалы	
магнитоиндукционный прибор		измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением 2 кВ	
электростатический прибор		нормальное (номинальное) значение частоты	500 Hz
термоэлектрический прибор с изолированным преобразователем и магнитоэлектрическим измерительным механизмом		измерение постоянного тока	—
выпрямительный прибор с магнитоэлектрическим измерительным механизмом		измерение переменного тока	~
защита от внешних магнитных полей		измерение постоянного и переменного тока	~
защита от внешних электростатических полей			

По характеру зависимости линейных или угловых расстояний между соседними отметками шкалы от измеряемой величины различают **равномерные**, **неравномерные**, **степенные**, **логарифмические** и другие шкалы. Для точности измерений предпочтительнее равномерная шкала. Шкала считается равномерной, если отношение наибольшего деления к наименьшему не превышает 1,3 при постоянной цене деления.

Рядом со шкалой на лицевой стороне электроизмерительного прибора указывают необходимые маркировочные признаки: единица измеряемой величины; класс точности; номер ГОСТа, в соответствии с которым прибор изготовлен; род тока и число фаз; система прибора; категория защищенности прибора от влияния внешних магнитных или электрических полей; группа прибора по условиям эксплуатации; рабочее положение прибора; испытательное напряжение прочности электрической изоляции токоведущих частей прибора; положение прибора относительно земного магнитного поля (если это влияет на его показания); номинальная частота тока (если она отличается от 50 Гц); год выпуска; тип (шифр); заводской номер и некоторые другие данные. В таблице на стр. 27 приведены основные условные обозначения маркировочных признаков электроизмерительных приборов.

## 2.6. Омметры

В омметрах применен метод непосредственной оценки измеряемой величины, которая находится непосредственно по шкале, заранее проградуированной в соответствующих единицах, или считывается с электронного табло цифровых приборов. Простейшим омметром является электромеханический омметр с однорамочным измерительным механизмом. Он может быть выполнен по последовательной или параллельной схемам. Омметр состоит из источника питания, измерительного механизма и переменного резистора.

Источником питания омметров подобного вида служит, как правило, батарея гальванических элементов. В качестве измерителя И используется однорамочный магнитоэлектрический измерительный механизм с добавочным сопротивлением  $R_d$  (примером такого измерительного механизма служит гальванометр магнитоэлектрической системы).

Рассмотрим сначала **последовательную схему омметра** (рис. 2.3а).

При включении в цепь резистора с неизвестным сопротивлением измеряется сила тока, которая обратно пропорциональна сопротивлению цепи. Сила тока, протекающего через измерительный механизм при разомкнутом ключе К, определяется выражением:

$$I = \frac{U}{R_x + R_{\text{и}} + R_d + R_6} \quad (2.11)$$

где  $R_{\text{и}}$  - сопротивление измерительного механизма,  $R_6$  - сопротивление батареи элементов,  $R_d$  - сопротивление добавочного резистора,  $R_x$  - измеряемое сопротивление.

С другой стороны, эта же сила тока равна:

$$I = K_I * \alpha, \quad (2.12)$$

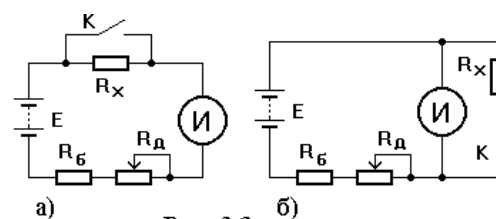
где  $K_I$  - постоянная измерительного механизма по току,

$\alpha$  - угол поворота подвижной части измерительного механизма.

Приравняв формулы (2.11) и (2.12), найдем  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{U}{K_I * (R_x + R_{\text{и}} + R_d + R_6)} \quad (2.13)$$

При постоянных значениях  $U$ ,  $K_I$ ,  $R_6$ ,  $R_{\text{и}}$  и  $R_d$  угол поворота измерительного механизма  $\alpha$  определяется значением измеряемого сопротивления  $R_x$ , то есть шкала прибора может быть проградуирована в единицах сопротивления. Из формулы для  $\alpha$  следует, что шкала у омметра неравномерная.



При бесконечно большом сопротивлении  $R_x$  стрелка прибора не отклоняется, так как ток равен нулю. При нулевом сопротивлении (или замкнутом ключе К) сила тока наибольшая и стрелка отклоняется на всю шкалу.

Таким образом, нуль шкалы находится у рассматриваемых омметров справа, что соответствует максимальному углу поворота подвижной части измерительного механизма, так как при  $R_x=0$  угол  $\alpha$  максимален. Промежуточные значения сопротивления  $R_x$  вызовут отклонение стрелки омметра в пределах от нуля шкалы до бесконечного сопротивления на шкале.

Недостатком этого способа измерения является то, что с течением времени ЭДС батареи уменьшается, что приводит к погрешности в измерении сопротивления. Для поддержания постоянного напряжения на измерительном механизме используют добавочный резистор  $R_d$ . При замкнутом ключе К производится установка нуля омметра изменением сопротивления резистора  $R_d$ .

Омметры с последовательной схемой используются для измерения сравнительно больших сопротивлений (единиц килоом), при меньших значениях  $R_x$  эта схема имеет малую чувствительность. По последовательной схеме выполнен омметр комбинированного прибора АВО-63.

При измерении небольших сопротивлений применяются омметры, выполненные по **параллельной схеме** (рис. 2.3 б).

При замыкании ключа К ток протекает по двум параллельно соединенным участкам: через измерительный механизм и измеряемый резистор  $R_x$ . Если резистор  $R_x$  отсутствует и замкнут ключ (короткое замыкание выводов измерительного механизма), то весь ток протекает через ключ и стрелка измерительного механизма не отклоняется.

Если же в качестве резистора  $R_x$  взято бесконечно большое сопротивление (соответствует разомкнутому ключу), то весь ток протекает через измерительный механизм и его стрелка отклоняется на всю шкалу. Таким образом, нуль шкалы у такого типа омметров слева. Для контроля правильности показаний прибора размыкают ключ. В этом случае стрелка должна находиться в крайнем правом положении.

В приборе Ц4353 реализованы обе схемы (последовательная и параллельная).

Проверку омметров можно провести с помощью магазина сопротивлений.

В практической работе удобны омметры с **равномерной шкалой**. На рисунке 2.4а приведена структурная схема омметра с равномерной шкалой, в ко-

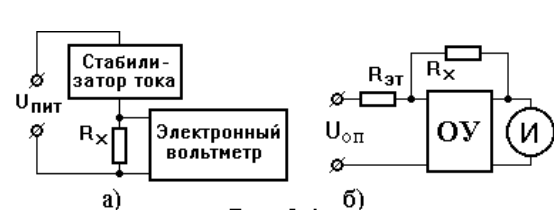


Рис. 2.4

тором исследуемый резистор  $R_x$  включают в цепь стабилизатора тока (ток в цепи стабилизатора тока на зависит от сопротивления нагрузки). Напряжение на резисторе  $R_x$ , измеренное вольтметром с

большим внутренним сопротивлением, пропорционально сопротивлению исследуемого резистора. На рисунке 2.4б приведена схема омметра с равномерной шкалой на базе операционного усилителя. Измеряемое сопротивление определяется по формуле  $R_x = U_{\text{вых}} R_{\text{эт}} / U_{\text{оп}}$ , где  $U_{\text{вых}}$  – напряжение на выходе операционного усилителя ОУ,  $U_{\text{оп}}$  – напряжение опорного источника,  $R_{\text{эт}}$  – сопротивление эталонного резистора. Измеряемое сопротивление прямо пропорционально выходному напряжению и отсчитывается по равномерной шкале измерительного прибора И, отградуированной в единицах сопротивления.

## 2.7. Делитель напряжения

Достаточно часто в некоторых участках схемы необходимо иметь величину напряжения меньше, чем напряжение источника питания. В этом случае можно использовать делитель напряжения на резисторах (рис. 2.5а). Изменяя соотношение между величинами сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$ , на выходе делителя можно получить любое значение напряжения, но не более входного. Выходное напряжение делителя при бесконечно большом сопротивлении нагрузки можно рассчитать по формуле

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.14)$$

Для объяснения принципа работы электронных схем необходимо хорошо представлять работу делителя напряжения на резисторах. Можно выделить три

задачи, которые необходимо быстро решать при рассмотрении принципа работы электронных устройств, содержащих делитель напряжения:

1. Как и почему изменяется выходное напряжение делителя, если входное напряжение не изменяется (постоянное напряжение или переменное напряжение с неизменяющейся со временем амплитудой), сопротивление резистора  $R_2$  не изменяется, а сопротивление резистора  $R_1$  увеличивается (уменьшается)?
2. Как и почему изменяется выходное напряжение делителя, если входное напряжение не изменяется (постоянное напряжение или переменное напряжение с неизменяющейся со временем амплитудой), сопротивление резистора  $R_1$  не изменяется, а сопротивление резистора  $R_2$  увеличивается (уменьшается)?
3. Как и почему изменяется выходное напряжение делителя, если сопротивления резисторов  $R_1$ ,  $R_2$  не изменяются, а входное напряжение увеличивается (уменьшается)?

Для всех трех задач дать ответ на поставленный вопрос можно, проанализировав формулу (2.14) для определения выходного напряжения делителя. Решить указанные задачи можно и другим способом.

В первой задаче для определения изменения выходного напряжения воспользуемся формулой  $U_{\text{вых}} = I_d \cdot R_2$ . Так как сопротивление резистора  $R_2$  неизменно, то для ответа на вопрос задачи достаточно выяснить, как будет изменяться ток  $I_d$  при увеличении (уменьшении) сопротивления резистора  $R_1$ . При увеличении сопротивления резистора  $R_1$  общее сопротивление последовательно соединенных резисторов  $R_1$  и  $R_2$  будет увеличиваться и при неизменном входном напряжении делителя будет уменьшаться ток делителя  $I_d$  (по закону Ома для участка цепи). Уменьшение тока делителя при неизменном сопротивлении резистора  $R_2$  приведет к уменьшению выходного напряжения.

При уменьшении сопротивления резистора  $R_1$  сила тока в цепи увеличивается и увеличивается выходное напряжение.

Во второй задаче при увеличении сопротивления резистора  $R_2$  общее сопротивление цепи увеличится, следовательно, при неизменном входном напряжении сила тока в цепи уменьшится. Использовать формулу  $U_{\text{вых}} = I_d \cdot R_2$  для определения изменения выходного напряжения нельзя, так как в этом случае сила тока  $I_d$  уменьшается, а сопротивление  $R_2$  увеличивается. Поэтому определим сначала, как изменится напряжение  $U_1$ :  $U_1 = I_d \cdot R_1$ . Поскольку сила тока  $I_d$  уменьшается, а сопротивление  $R_1$  не изменяется, то напряжение  $U_1$  уменьшится. Входное напряжение равно сумме напряжений на резисторах  $R_1$  и  $R_2$ :  $U_{\text{вх}} = U_1 + U_{\text{вых}}$ . Поскольку входное напряжение не изменяется, то при уменьшении напряжения на первом резисторе выходное напряжение (напряжение на втором резисторе) увеличивается.

Таким образом, при увеличении сопротивления того резистора делителя, с которого снимается выходное напряжение, выходное напряжение увеличивается, и наоборот.

В третьей задаче при увеличении (уменьшении) входного напряжения выходное напряжение делителя увеличивается (уменьшается), поскольку увеличивается (уменьшается) сила тока  $I_d$ .

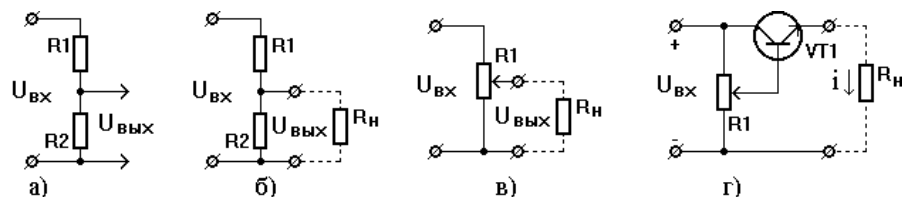


Рис. 2.5

Сопротивления резисторов делителя при конечном значении сопротивления нагрузки (рис. 2.5 б, в) можно рассчитать по формулам:

$$R_1 = \frac{U_{вх} - U_{вых}}{I_d + I_n} \quad R_2 = \frac{U_{вых}}{I_d}$$

где  $U_{вх}$  и  $U_{вых}$  - входное и выходное напряжение делителя, а  $I_d$  и  $I_n$  - ток делителя и ток нагрузки.

Делители напряжения рекомендуется использовать при малой силе тока нагрузки и небольших ее колебаниях.

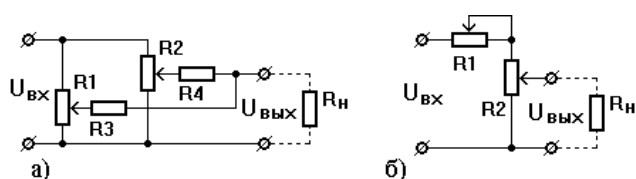


Рис. 2.6

(рис. 2.5 в). При регулировках в цепях постоянного напряжения дополнительно к делителю напряжения на переменном резисторе широко используют усилитель тока на биполярном транзисторе (рис. 2.5 г). Такая схема подключения нагрузки позволяет получить существенно больший ток при тех же значениях выходного напряжения. Транзистор VT1 желательно взять составным, так как такой транзистор имеет большой коэффициент усиления по току.

Иногда требуется очень точно и плавно регулировать выходное напряжение делителя. Такую задачу можно решить, используя одну из двух схем делителя, приведенных на рисунке 2.6. Если в схеме рисунка 2.6а сопротивление резистора R3 существенно больше сопротивления резистора R4, то резистором

В качестве делителя можно использовать потенциометры, в которых плавно изменяется отношение входного и выходного напряжений

R2 осуществляют грубую регулировку выходного напряжения, а резистором R1 – точную. В схеме рисунка 2.6 б сопротивление резистора R1 выбирают меньше сопротивления резистора R2 и резистором R2 выходное напряжение регулируют грубо, а резистором R1 – точно.

## 2.8. Влияние электроизмерительных приборов на режим работы электрической цепи

Как отмечалось выше, мощность, потребляемая прибором от измерительной цепи, должна быть мала, чтобы не вносить дополнительных погрешностей в измерения. Мощность, выделяющуюся на участке электрической цепи, можно найти по одной из трех формул:  $P=I^2R$ ,  $P=IU$ ,  $P=U^2/R$ .

Амперметр включается в цепь последовательно с нагрузкой, а вольтметр параллельно нагрузке. Поэтому мощность, выделяющуюся на амперметре, удобно рассчитывать по формуле  $P=I^2R$ , а на вольтметре –  $P=U^2/R$ . Чтобы мощность, потребляемая измерительным прибором, была наименьшей, то необходимо, как следует из этих формул, чтобы внутреннее сопротивление амперметра было как можно меньше (для идеального амперметра равно нулю), а внутреннее сопротивление вольтметра было как можно больше (в идеальном случае – бесконечно).

Для демонстрации влияния внутреннего сопротивления электроизмерительных приборов на режим работы электрической цепи проведем серию экспериментов.

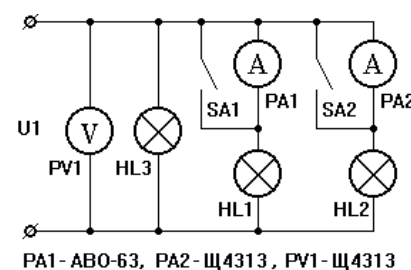


Рис. 2.7

В первом эксперименте покажем, что внутреннее сопротивление амперметра должно быть как можно меньше, и что переход на более чувствительный предел измерения может увеличить влияние прибора на режим работы цепи. Для этого будем использовать одинаковые лампочки (1 В, 0,068 А), амперметр комбинированного прибора АВО-63, амперметр комбинированного

прибора Щ4313, вольтметр комбинированного прибора Щ4313. Соберем приборы по схеме, изображенной на рисунке 2.7 и подадим постоянное напряжение 1В от источника ИЭПП-2 или аналогичного. Ключи SA1 и SA2 первоначально замкнуты. Таким образом, на лампочки HL1, HL2 подается номинальное напряжение. Лампочка HL3 является контрольной при проведении эксперимента, на нее всегда подается номинальное напряжение питания.

АВО-63 включим на пределе 500 мА, а Щ4313 на пределе 2000 мА. Размыкая ключи SA1 и SA2, наблюдаем, что накал лампочки HL1 уменьшился, а накал лампочки HL2 практически не изменился. Параллельно лампочке HL1 подключаем еще 6 таких же лампочек. Лампочка HL1 и подключенные к ней параллельно 6 лампочек не горят, а контрольная лампочка HL3 продолжает нормально гореть. Замкнем ключ SA1. Все лампочки загораются. Проведя аналогичные эксперименты с лампочками в цепи с амперметром прибора Щ4313, убеждаемся, что влияние прибора Щ4313 на режим работы лампочек существенно меньше, чем влияние прибора АВО-63. Включив 2 лампочки в цепь амперметра Щ4313, переключим предел измерения прибора с 2000 мА на 200 мА. Накал лампочек в этом случае уменьшится.

Измерим внутреннее сопротивление амперметров. Для этого подключим поочередно параллельно каждому из амперметров вольтметр Щ4313 (изменение режима работы электрической цепи приборами не фиксируется) и измерим напряжение на зажимах амперметра. Зная протекающей через амперметр ток, по закону Ома для участка цепи определим внутреннее сопротивление амперметра. Схема подключения приборов для определения внутреннего сопротивления амперметра приведена на рисунке 2.8. При определении внутреннего сопротивления прибора Щ4313 на пределе 2000 мА необходимо правильно выбрать точки подключения вольтметра, чтобы исключить сопротивление идущих к амперметру проводов.

Внутреннее сопротивление амперметра постоянного тока для прибора Щ4313 на разных пределах измерения приведено в таблице:

Предел измерения, мА	0,2	2	20	200	2000
Внутр. сопротивл., Ом	1000	100	10	1	0,1

Сопротивление амперметра постоянного тока АВО-63 на пределе измерения 500 мА равно 1,8 Ом, а на пределе измерения 50 мА - 18 Ом.

Повторим эксперимент с лампочками на 2,5В, 0,068А. В этом случае влияние внутреннего сопротивления амперметра на накал электрической лампочки меньше по сравнению с лампочкой, рассчитанной на меньшее напряжение. Затем соединим последовательно 5 лампочек на 2,5В, 0,068А и подадим на них номинальное напряжение питания 12,5 В. В ходе эксперимента делаем вывод, что включение в цепь амперметра практически не изменяет накал лампочек. Из этих экспериментов следует, что в низковольтных цепях включение амперметра последовательно с нагрузкой оказывает существенное влияние на режим работы электрической цепи (приводит к уменьшению силы тока).

Следующий эксперимент позволяет обосновать необходимость учета внутреннего сопротивления вольтметра при измерении напряжения на участках цепи. Для этого будем использовать делители напряжения.

Рассмотрим три делителя напряжения на резисторах с одинаковыми коэффициентами передачи (рис. 2.9). Будем измерять выходное напряжение указанных делителей напряжения вольтметрами приборов АВО-63 и Щ4313. Выберем пределы измерения напряжения 2В на каждом из приборов. Постоянное напряжение 3–4 В можно снимать с источника электропитания ИЭПП-2.

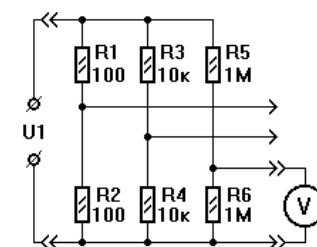


Рис. 2.9

При измерениях поочередно каждым вольтметром получаем, что напряжение на резисторе R2 практически равно половине напряжения питания. На резисторе R4 вольтметр Щ4313 показывает напряжение чуть меньше половины  $U_1$ , а вольтметр АВО-63 показывает третью часть напряжения  $U_1$ . На резисторе R6 вольтметр Щ4313 показывает третью часть напряжения питания, а вольтметр АВО-63 практически нуль. Если включать одновременно оба вольтметра, то их показания будут одинаковыми (в пределах класса точности каждого прибора) и примерно равными показаниям АВО-63, когда он подключался один. Из экспериментов делаем вывод, что если внутреннее сопротивление вольтметра сравнимо с сопротивлением резистора, на котором измеряется напряжение, то измерительный прибор нарушает режим работы электрической цепи.

Определить внутреннее сопротивление вольтметра можно одним из следующих способов. На рисунке 2.10а приведена схема с использованием вольтметра и микроамперметра. Микроамперметр измеряет протекающий через вольтметр ток, а вольтметр – напряжение на себе самом. Разделив показания вольтметра на показания микроамперметра, найдем внутреннее сопротивление вольтметра.

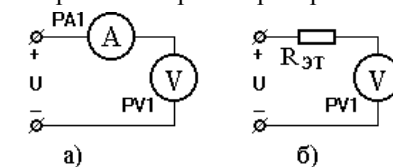


Рис. 2.10

Внутреннее сопротивление вольтметра можно найти также, имея набор резисторов известного сопротивления. Вначале вольтметром измеряют напряжение на зажимах источника с малым внутренним сопротивлением ( $U_1$ ). Затем последовательно с вольтметром включают резистор известного сопротивления и снова измеряют напряжение –  $U_2$  (рис. 2.10б). Ток, протекающий через вольтметр, рассчитывают по формуле  $I = (U_1 - U_2) / R_{эт}$ . Внутреннее сопротивление вольтметра определяют по формуле  $R_V = U_2 / I$ .

После эксперимента с делителем напряжения можно сделать вывод о том, что прибор АВО-63 больше изменяет режим работы электрической цепи как при измерении силы тока, так и при измерении напряжения.

Особенно велико влияние измерительных приборов на режим работы электрических цепей с нелинейными элементами. Рассмотрим измерение сопротивления полупроводникового диода в прямом направлении. Измерим сопротивление диода в прямом направлении омметром прибора АВО-63 на пределах  $\times 1$  и  $\times 10$ . Различие показаний прибора объясняется тем, что при измерениях на пределах  $\times 1$  и  $\times 10$  во внешней цепи омметра протекают разные токи, что приводит к изменению режима работы диода. Омметр прибора АВО-63 имеет последовательную схему питания. Проведем измерения омметром, имеющим параллельную схему питания. Прибор Ц4353 имеет как параллельную (для измерения малых сопротивлений), так и последовательную схемы питания омметров. При измерении на пределе  $k\Omega \times 0,01$  сопротивление диода Д226Б оказалось равным 140 Ом. Попытка измерить сопротивление этого же диода на пределе  $\Omega$  дает бесконечно большое сопротивление диода (на подключение диода стрелка прибора никак не реагирует). На пределе  $k\Omega \times 0,1$  сопротивление диода 1,1 кОм, а на пределе  $k\Omega \times 1$  сопротивление диода равно 8 кОм. На пределе  $k\Omega \times 0,01$  сопротивление диода Д7В равно 50 Ом.

Результаты измерений сопротивления диодов приведены в таблице:

Пределы измерения Ц4353	$\Omega$	$k\Omega \times 0,01$	$k\Omega \times 0,1$	$k\Omega \times 1$
Сопротивление диода Д226Б (Ом)	$\infty$	140	1100	8000
Сопротивление диода Д7В (Ом)	150	50	200	

Существенные различия в результатах измерения сопротивления диода на разных пределах измерения объясняются влиянием омметра на режим работы полупроводникового диода (сопротивление диода зависит от приложенного к нему напряжения). Утверждение о том, что сопротивление диода в прямом направлении равно столько-то Ом, нельзя признать корректным. Обязательно необходимо добавлять при каком напряжении на диоде определялось сопротивление диода, либо какой измерительный прибор и на каком пределе измерения использовался.

## 2.9. Способы подключения электроизмерительных приборов (амперметр, вольтметр) к участку цепи в зависимости от его сопротивления

Для измерения активных сопротивлений с помощью амперметра и вольтметра можно воспользоваться одной из схем (рис. 2.11 а, 2.11 б).

В обоих случаях сопротивление рассчитывается по формуле:

$$R = \frac{U_R}{I_R} \quad (2.15)$$

Если бы измерительные приборы были идеальными (внутреннее сопротивление амперметра равно нулю, вольтметра - бесконечности), то они не внесли бы искажений в электрическую цепь и полученное в результате расчета значение сопротивления было бы верным. Наличие же конечных сопротивлений у измерительных приборов приводит в обеих схемах к погрешности измерений.

Значение сопротивления  $R$ , измеренного по схеме 2.11а, будет меньше его действительного значения, поскольку амперметр измеряет сумму токов, проходящих через вольтметр и через резистор:

$$U_V = U_R, \quad I_A = I_R + I_V$$

С учетом внутреннего сопротивления вольтметра значение сопротивления будет равно:

$$R = \frac{U_R}{I_R} = \frac{U_V}{I_A - I_V} = \frac{U_V}{I_A - \frac{U_V}{r_V}} \quad (2.16)$$

Из схемы и формулы (2.16) видно, что чем больше внутреннее сопротивление вольтметра по сравнению с сопротивлением резистора, тем меньший ток проходит через вольтметр и тем меньше погрешность измерений.

Значение сопротивления  $R$ , измеренного по схеме 2.11б, будет больше его действительного значения, так как вольтметр измеряет сумму напряжений на амперметре и резисторе:

$$U_V = U_R + U_A, \quad I_A = I_R$$

С учетом внутреннего сопротивления амперметра значение сопротивления будет равно:

$$R = \frac{U_R}{I_R} = \frac{U_V - U_A}{I_A} = \frac{U_V - I_A \cdot r_A}{I_A} \quad (2.17)$$

Погрешность измерений в этом случае будет тем меньше, чем меньше сопротивление амперметра по сравнению с измеряемым сопротивлением.

Таким образом, схемой 2.11а следует пользоваться для измерения малых сопротивлений, а схемой 2.11б - для измерения больших сопротивлений. Для более точных расчетов сопротивления участка цепи необходимо учитывать

внутренние сопротивления измерительных приборов и вместо формулы (2.15) использовать формулы (2.16) и (2.17) в зависимости от выбранной схемы.

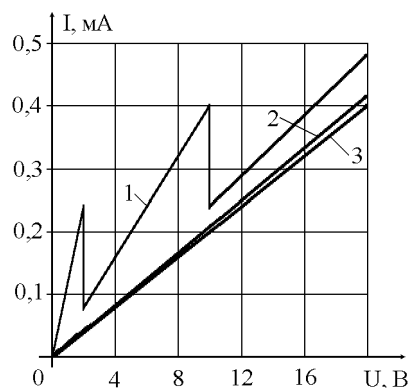


Рис. 2.12

а в качестве вольтметра – прибор Щ4313. График 3 представляет собой совпадающие графики, построенные по экспериментальным данным графиков 1 и 2 с учетом внутреннего сопротивления измерительных приборов.

В паспортах измерительных приборов не всегда указываются точные значения внутренних сопротивлений. Так, например, для прибора Щ4313 указано, падение напряжения на зажимах прибора при измерении постоянного тока не превышает 600 мВ. Нами экспериментально определено, что при измерении постоянного тока падение напряжения на зажимах прибора Щ4313 равно 199,9 мВ при максимальном показании (без перегрузки) на любом из пределов измерения тока. Значения внутреннего сопротивления амперметра прибора Щ4313 на разных пределах измерения приведены на странице 34.

## 2.10. Изменение пределов измерения амперметра и вольтметра (расчет шунтов и добавочных резисторов)

В практике электрических измерений встречается необходимость измерять токи, напряжения и другие величины в очень широком диапазоне их значений. Для измерения малых токов и напряжений используется *гальванометр*. Рассмотрим, каким образом можно расширить его возможности (пределы измерения) для измерения токов и напряжений.

Допустим, гальванометр может измерять максимальную силу тока  $I_r$ , а нам необходимо измерить силу тока  $I$ . Тогда ток  $I - I_r$  необходимо пропустить не через гальванометр (микроамперметр), а рядом, по параллельной цепи (рис. 2.13 а).

На рисунке 2.12 приведены графики вольт-амперной характеристики резистора сопротивлением 50 кОм. График 1 построен по показаниям амперметра и вольтметра. Приборы были собраны по схеме рисунка 2.11а, в качестве амперметра и вольтметра использованы авометры АВО-63. По графику 1 хорошо видно как влияет переключение пределов измерения вольтметра (2В, 10В, 50В) на режим работы электрической цепи. На графике 2 показана ВАХ резистора, снятая по точкам по той же схеме, где в качестве амперметра используется АВО-63,

Такую электрическую цепь, включаемую параллельно гальванометру и служащую для расширения пределов измерения амперметра, называют **шунтом**. В этом случае возникает необходимость рассчитать сопротивление шунта и проградуировать шкалу гальванометра в новых значениях силы тока.

Пусть  $I$  – сила тока, которую необходимо измерить,  $I_r$  – максимальная сила тока, которую может измерить гальванометр. Тогда  $I_{ш} = I - I_r$  – сила тока, которая должна протекать через шунт. Обозначим  $R_r$  – сопротивление гальванометра,  $R_{ш}$  – сопротивление шунта. По законам параллельного соединения проводников  $U_{ш} = U_r$  или  $I_{ш} \cdot R_{ш} = I_r \cdot R_r$ . Отсюда, с учетом силы тока через шунт, получим:

$$R_{ш} = (I_r \cdot R_r) / I_{ш} = (I_r \cdot R_r) / (I - I_r) = R_r / (n - 1). \quad (2.18)$$

Здесь  $n = I / I_r$  – коэффициент шунтирования. Рассчитав по формуле (2.18) сопротивление шунта, подбираем шунт. Для изготовления шунтов на небольшие токи используют провод из манганина, а на большие – манганиновые пластины (манганин обладает малым температурным коэффициентом сопротивления и поэтому сопротивление шунта почти не изменяется при нагревании протекающим током). Схема подключения многопредельных шунтов на небольшие токи показана на рисунке 2.13 б.

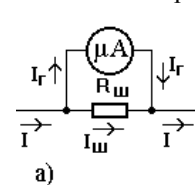


Рис. 2.13

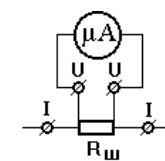
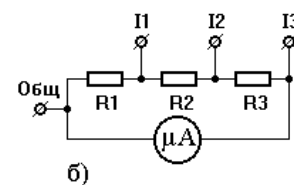


Рис. 2.14

Шунты на токи до 30 А обычно встраивают внутрь прибора. Для измерения больших токов (до 6000 А) используют приборы с наружными шунтами. Наружные шунты имеют массивные наконечники из красной меди, к которым подключаются токовые и потенциальные зажимы. Шунт представляет собой четырехзажимный резистор. Два зажима шунта, к которым подводится ток, называются токовыми, а два зажима, с которых снимается напряжение, называются потенциальными. К потенциальным зажимам шунта подключается измерительный механизм. Схема подключения четырехзажимного шунта показана на рисунке 2.14.

Наружные шунты делают взаимозаменяемыми. Шунты в соответствии с ГОСТ могут иметь номинальное падение напряжения на потенциальных зажимах 10, 15, 30, 50, 60, 75, 300 мВ.

Для расширения пределов измерения гальванометра при использовании его в качестве вольтметра последовательно с гальванометром включают **добавочный резистор** (рис. 2.15 а). Рассчитаем сопротивление добавочного резистора.

Пусть  $U$  – напряжение, которое надо измерить вольтметром,  $U_r$  – максимальное напряжение, которое может измерить гальванометр. Тогда  $U_d = U - U_r$  – напряжение, которое должно падать на добавочном резисторе. Обозначим  $R_r$  – сопротивление гальванометра,  $R_d$  – сопротивление добавочного резистора. По законам последовательного соединения проводников  $I_r = I_d$  или  $U_r/R_r = U_d/R_d$ .

Отсюда с учетом напряжения на добавочном резисторе получим:

$$R_d = R_r (U - U_r) / U_r = R_r (n - 1), \quad (2.19)$$

где  $n = U/U_r$ .

Рассчитав сопротивление добавочного резистора, выбирают соответствующий постоянный резистор с учетом его мощности рассеяния. Далее градуируют шкалу гальванометра в новых значениях напряжения. Добавочные резисторы бывают встраиваемые в корпус прибора и наружные. На рисунках 2.15б и 2.15в показаны различные способы подключения встроенных добавочных резисторов. Добавочные резисторы для работы на переменном токе должны иметь бифилярную намотку (проволочный резистор, имеющий бифилярную намотку, не обладает индуктивным сопротивлением).

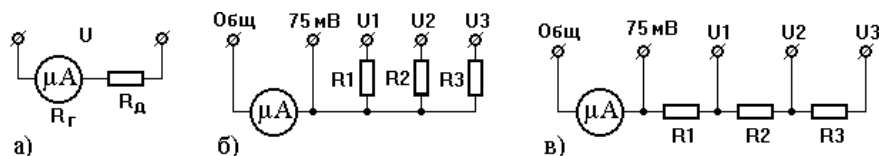


Рис. 2.15

Шунты и добавочные резисторы в основном применяют с магнитоэлектрическими измерительными механизмами.

## 2.11. Электронные осциллографы

*Электронный осциллограф* – это прибор, служащий для наблюдения и измерения параметров электрических сигналов. В нем используется отклонение электронного луча для получения изображения мгновенных значений функциональных зависимостей переменных величин, одной из которых обычно является время.

Для исследования зависимости электрического напряжения от времени исследуемое напряжение подается на вход "Y" осциллографа и включается генератор развертки, вырабатывающий линейно изменяющееся напряжение.

Для исследования зависимости одного напряжения (тока) от другого первое из указанных напряжений подается на вход "Y", а второе – на вход "X", генератор развертки в этом случае отключается.

Существуют многолучевые и многоканальные осциллографы. В многолучевых

осциллографах применяются специальные многолучевые электронные трубки, а в многоканальных – специальные коммутаторы электрических сигналов, позволяющие наблюдать несколько сигналов на экране однолучевой ЭЛТ.

Понять принцип работы электронного осциллографа поможет рисунок 2.16, на котором приведена структурная схема осциллографа.

Структурная схема осциллографа включает:

- электронно-лучевую трубку (ЭЛТ);
- канал "Y" (канал вертикального отклонения луча), содержащий входное устройство, предварительный усилитель Y, линию задержки сигнала, оконечный усилитель Y;
- канал "X" (канал горизонтального отклонения луча), содержащий генератор развертки по оси X, устройство синхронизации, предварительный и оконечный усилители X;
- канал Z (канал управления яркостью луча);
- калибровочное устройство.



Рис. 2.16

Кроме этого в состав электронного осциллографа входят не показанные на структурной схеме низковольтный и высоковольтный выпрямители.

Одним из основных узлов осциллографа является *электронно-лучевая трубка*. Она представляет собой стеклянный баллон с высоким вакуумом, в котором имеется система электродов и экран, покрытый люминофором. При попадании на экран электронов наблюдается свечение. В цилиндрической части трубки расположены катод, модулятор, первый и второй аноды, две пары

отклоняющих пластин. Источником электронов является оксидный катод. Катод подогревается с помощью нити накала, изолированной от катода. Систему электродов (катод, цилиндрический модулятор, первый и второй аноды) называют *электронной пушкой*. На модулятор относительно катода подают отрицательный потенциал, величину которого регулируют переменным резистором и этим самым изменяют яркость светящегося пятна на экране ЭЛТ. Первый анод используется для фокусировки электронного луча. Второй анод служит для ускорения электронов. Некоторые трубки имеют третий анод, позволяющий повысить яркость свечения экрана. Последняя буква в условном обозначении ЭЛТ указывает тип люминесцентного покрытия экрана: А – покрытие дает голубое свечение и малую продолжительность послесвечения, В – длительное послесвечение (порядка нескольких секунд), И – покрытие дает зеленое свечение средней продолжительности. Длительность послесвечения ЭЛТ можно оценить экспериментально, не подключая ЭЛТ. С этой целью освещают в течение нескольких секунд экран ЭЛТ карманным фонариком и, выключив фонарик, наблюдают в темноте уменьшение с течением времени яркости свечения экрана. Покрытие типа И благоприятно для визуального наблюдения сигналов с частотой выше 10 Гц.

Входное устройство канала "Y" включает в себя соединительный кабель, переключатель входа и входные делители напряжения.

Соединительный кабель служит для согласования выхода источника сигнала со входом осциллографа во всем рабочем диапазоне частот (согласование характеризуют коэффициентом стоячих волн), а также защиты от влияния внешних мешающих электромагнитных полей. Соединительный кабель обычно является *коаксиальным*.

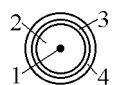


Рис. 2.17

Коаксиальный кабель (рис. 2.17) имеет внутренний проводник 1, который цилиндрическим изолятором 2 отделен от внешней проводящей оболочки 3 (оплетки). Эта оболочка обычно также покрывается защитной изоляцией 4. Оплетка изготавливается из большого числа тонких медных проводников. Один конец коаксиального кабеля обычно имеет разъем для подключения к прибору, а ко второму присоединяются два проводника. Проводник, соединенный с оплеткой, выбирается, как правило, с изоляцией черного цвета. Проводник, подключаемый к центральной жиле кабеля, называют сигнальным. Проводящая оболочка кабеля подключается к корпусу измерительного прибора.

С помощью переключателя входа можно выбрать один из двух способов подачи сигнала к предварительному усилителю: через конденсатор (закрытый вход) или непосредственно — для сигналов постоянного тока и импульсов большой длительности (открытый вход).

Некоторые осциллографы имеют только встроенные входные делители напряжения. Выносной входной делитель напряжения называют пробником. Входные делители требуют сложной настройки при изготовлении осциллографа, чтобы они передавали сигнал без искажений независимо от амплитуды и формы во всем диапазоне частот данного прибора. Делители напряжения строят с использованием резисторов и конденсаторов. Схема одного из вариантов

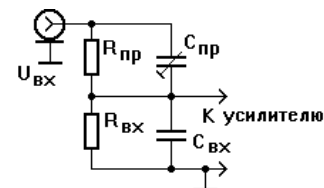


Рис. 2.18

простого частотно-компенсированного делителя напряжения приведена на рисунке 2.18. Настраивают такие делители напряжения с помощью генераторов прямоугольных импульсов напряжения и осциллографа. Делитель настраивают подстроечным конденсатором так, чтобы на выходе делителя импульсы были прямоугольными, так же, как и на его входе.

Предварительный усилитель канала вертикального отклонения предназначен для усиления исследуемого сигнала, преобразования сигнала из несимметричного в симметричный, установки изображения сигнала (совместно с аттенуатором во входном устройстве) в пределах рабочей части экрана по вертикали, обеспечения совместной работы с коммутатором в многоканальных осциллографах.

Линия задержки, включаемая в канал вертикального отклонения осциллографов, позволяет задержать сигнал на время, необходимое для запуска генератора развертки. При отсутствии линии задержки на экране осциллографа не будет виден передний фронт исследуемого сигнала. Линия задержки не должна искажать форму исследуемого сигнала.

Оконечный усилитель канала вертикального отклонения луча обеспечивает усиление исследуемого сигнала до значения, достаточного для отклонения луча ЭЛТ по вертикали в пределах рабочей части экрана.

Коммутатор сигналов (на структурной схеме осциллографа не показан) позволяет использовать усилитель канала Y в следующих режимах: только канал Y1, только канал Y2, одновременная работа обоих каналов (сложение сигналов с возможностью изменения полярности сигнала в одном из каналов), поочередная работа обоих каналов (переключение каналов обратным ходом развертки), прерывистый режим (переключение каналов с частотой несколько десятков или сотен килогерц от специального генератора прямоугольных импульсов напряжения).

Если исследуемое напряжение (при необходимости оно усиливается усилителем) подано только на пластины "Y", то на экране осциллографа будет

видна вертикальная линия, длина которой равна удвоенной амплитуде колебаний. Для изучения изменения сигнала с течением времени необходимо подать напряжение на горизонтально отклоняющие пластины. Напряжение для отклонения луча в горизонтальном направлении подается с выхода канала "Х", содержащего генератор развертки, устройство синхронизации, предварительный (на структурной схеме не показан) и оконечный усилители Х.

*Генератор развертки* вырабатывает пилообразное (линейно изменяющееся напряжение), которое предназначено для равномерного перемещения луча вдоль оси Х от левого до правого края экрана, а затем быстрого возвращения его в крайнее левое положение. Обратный ход луча на экране соответствует участкам быстрого изменения пилообразного напряжения.

Частоту напряжения, вырабатываемого генератором развертки, можно ступенчато и плавно менять в достаточно больших пределах (как правило, от 10 Гц до 1 МГц и более).

Если напряжение на входе "У" равно нулю, но включен генератор развертки, на экране будет видна горизонтальная линия. При наличии двух напряжений одновременно (входного и с генератора развертки) на экране будет видна осциллограмма исследуемого сигнала.

Генератор развертки в канале Х может иметь три режима работы: автоколебательный, т.е. периодический (для наблюдения синусоидальных и импульсных сигналов с небольшой скважностью), ждущий (для наблюдения исследуемых сигналов с большой и переменной скважностью), одиночной – разовой развертки (для фотографирования, а в запоминающих осциллографах и для непосредственного изучения одиночных сигналов). В ждущем режиме генератор развертки начинает вырабатывать пилообразное напряжение, если на вход "У" осциллографа поступает исследуемый сигнал достаточной амплитуды (в этом режиме, например, не удастся обеспечить внутреннюю синхронизацию при исследовании выпрямленного напряжения с малым коэффициентом пульсаций). В некоторых осциллографах имеется режим растяжки развертки, позволяющий получить более крупный масштаб изображения по горизонтальной оси за счет увеличения усиления в конечном усилителе Х.

Чтобы получить неподвижное изображение, частота генератора развертки должна быть равна или в целое число раз меньше частоты исследуемого сигнала. С этой целью осуществляют *синхронизацию* частоты генератора развертки (согласовывают во времени) с частотой исследуемого сигнала. Когда частота генератора развертки близка частоте исследуемого напряжения, то это напряжение изменяет частоту генератора развертки до точного совпадения с частотой исследуемого сигнала.

Согласование частоты генератора развертки с частотой исследуемого сигнала обеспечивает блок синхронизации. Существует три варианта синхронизации: внешняя, внутренняя и от сети. Синхронизацию от сети применяют для исследования сигналов, частота которых равна или кратна частоте питающей сети (50 Гц). Наиболее часто используют внутреннюю синхронизацию. В этом случае часть исследуемого напряжения подается в блок синхронизации, в котором вырабатываются импульсы, управляющие работой генератора развертки. Исследуемое напряжение как бы "навязывает" свой период генератору развертки. Если при этом период собственных колебаний генератора развертки почти равен (или почти кратен) периоду колебаний исследуемого напряжения, то колебания генератора синхронизируются и происходят в такт с исследуемым напряжением. Осциллографы снабжаются переключателем вида синхронизации и переключателем полярности синхронизирующего напряжения.

Оконечный усилитель канала Х предназначен для усиления напряжения развертки или внешнего сигнала до значения, достаточного для отклонения луча в пределах экрана по горизонтали.

Канал Z в основном предназначен для подсветки прямого хода развертки и гашения луча во время обратного хода. Канал Z позволяет модулировать яркость изображения внешним модулирующим сигналом. Если на входы Х и Y подать сигналы одной и той частоты, а на канал Z напряжение более высокой известной частоты, то по прерывистой эллиптической развертке можно определить частоту сигнала, подаваемого на входы Х и Y.

Встроенные в осциллограф калибраторы повышают точность измерения частоты и амплитуды сигнала. Калибратор представляет собой генератор напряжения с известной амплитудой и частотой. Чаще всего используются постоянные напряжения и напряжения в виде меандра (прямоугольные импульсы напряжения со скважностью равной двум, т.е. длительность импульса равна длительности паузы).

Высоковольтный выпрямитель блока питания служит для питания электродов электронно-лучевой трубки, а низковольтный для питания всех узлов осциллографа.

Осциллографы, выпускаемые в последние годы, имеют, как правило, калиброванную длительность развертки по оси Х и калиброванный коэффициент усиления усилителя "У". Это позволяет легко определять частоту и напряжение исследуемого сигнала.

При проведении исследований с помощью электронного осциллографа обязательно надо обращать внимание на *полосу пропускания* канала вертикального отклонения. Проведем эксперимент с осциллографами ОМЛ-3М и ОМШ-3М.

Электронный осциллограф ОМЛ-3М имеет полосу пропускания канала “У” от 0 до 5 МГц, а осциллограф ОМШ-3М - от 0 до 25 кГц. На входы вертикального отклонения обоих осциллографов подадим одновременно прямоугольные импульсы длительностью 2-3 микросекунды со скважностью равной двум. На экране осциллографа ОМЛ-3М форма импульсов прямоугольная, а на экране осциллографа ОМШ-3М импульсы имеют форму, аналогичную форме импульсов



Рис. 2.19

на выходе интегрирующей RC - цепи при подаче на ее вход прямоугольных импульсов напряжения (рис. 2.19). При изменении в широких пределах частоты следования прямоугольных импульсов, подаваемых на вертикальные входы осциллографов, наблюдаем изменение формы

сигнала на экранах. Полученные результаты можно объяснить, анализируя спектральный состав прямоугольных импульсов. Результаты проведенного эксперимента убеждают в необходимости учета полосы пропускания канала вертикального отклонения осциллографа для наблюдения без искажений прямоугольных импульсов.

## 2.12. Измерение с помощью осциллографа частоты сигнала, напряжения и сдвига фаз между двумя напряжениями

Перед началом измерений необходимо проверить исправность коаксиального кабеля и определить его сигнальный провод. Проверить исправность коаксиального кабеля проще всего с помощью омметра. Сначала измеряют сопротивление между двумя концами центрального проводника и между двумя концами проводящей оболочки. Эти сопротивления должны быть малыми (сотые доли ома). Затем проверяют отсутствие замыкания между центральным проводником и оплеткой кабеля. Иногда при ремонте коаксиального кабеля проводящая оболочка соединяется с проводником не черного цвета. В этом случае возникает задача определения сигнального проводника кабеля. Она может быть решена двумя способами. В первом случае один провод омметра подключают к центральному проводнику коаксиального разъема, а второй провод омметра поочередно подключают к каждому из двух проводников кабеля. Проводник, для которого сопротивление оказывается близким к нулю, и будет сигнальным. При другом способе определения сигнального провода необходимо, чтобы измерительный прибор (электронный осциллограф, электронный вольтметр) уже был включен в сеть и к нему подключен коаксиальный кабель. Затем касаются поочередно рукой каждого из двух проводников кабеля. Сигнальным будет проводник, при касании которого прибор регистрирует напряжение

частотой 50 Гц (наблюдается отклонение луча осциллографа или стрелки вольтметра). Человек выступает в этом случае в роли антенны, принимающей электромагнитные волны, излучаемые питающей сетью.

Осциллограф ОМЛ-3М комплектуется коаксиальным кабелем с литым разъемом, который отремонтировать достаточно сложно. В этом случае в осциллографе устанавливается дополнительное гнездо "земля", а коаксиальный кабель с обоих концов имеет по два внешне одинаковых проводника. Обычно проводники-выводы оплетки делают черного цвета, а сигнального провода – любого другого цвета. Если по внешнему виду измерительного кабеля нельзя опередить сигнальный провод, то можно воспользоваться следующим приемом. Выбрав предположительно сигнальный провод, подключают его ко входу "У" осциллографа, а второй проводник – к корпусу. Устанавливают достаточно высокую чувствительность осциллографа. Затем касаются рукой изоляции провода в средней его части (не касаясь при этом самих проводов!). Если на экране наблюдается сигнал наводки, то сигнальный провод выбран неверно. Если на экране нет изменений сигнала, то провод выбран верно.

Для демонстрации необходимости использования коаксиального кабеля для электронного вольтметра и осциллографа необходимо подать на эти приборы сигнал по обычным проводам и коснуться рукой их изоляции. При этом прибор фиксирует наводки.

Для измерения параметров электрических сигналов ручками смещения сигнала совместите сигнал с делениями шкалы так, чтобы было удобно проводить измерения. Выбирают положения переключателей “В/дел” такими, чтобы размер исследуемого сигнала по вертикали получался от 2 до 6 делений.

Рассмотрим определение *частоты* исследуемого сигнала. Пусть период исследуемого сигнала занимает два деления, а длительность развертки установлена 10 мс/дел. Тогда период исследуемого сигнала будет равен:  $2 \text{ дел} \cdot 10 \text{ мс/дел} = 20 \text{ мс}$ . Затем из формулы связи периода и частоты исследуемого сигнала ( $f = 1/T$ ) определим его частоту:

$$f = 1/20 \text{ мс} = 50 \text{ Гц}$$

Рассмотрим теперь, как определяется *амплитуда* напряжения исследуемого сигнала. Пусть исследуемый сигнал имеет синусоидальную форму. Амплитуда синусоидального сигнала равна половине размаха изображения по вертикали. Для ее нахождения определим сначала, сколько делений занимает изображение сигнала по вертикали. Умножив число делений, соответствующее амплитуде, на коэффициент отклонения в вольтах на деление, получим амплитуду сигнала в вольтах. Например, изображение синусоидального сигнала по вертикали занимает 4 деления. Следовательно, амплитуда исследуемого сигнала на

экране осциллографа будет составлять два деления. Если коэффициент отклонения равен 5 В/дел, то амплитуда сигнала будет равна 10 В.

Для измерения сдвига фаз между двумя напряжениями существует несколько способов. Остановимся кратко на двух из них: метод эллипса и с помощью двухлучевого осциллографа.

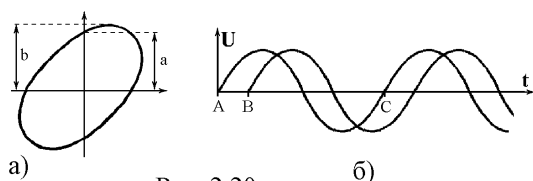


Рис. 2.20

При измерении методом эллипса одно напряжение подается на вход Y осциллографа, а другое – на вход X. Синус угла сдвига фаз равен отношению отрезка *a* к отрезку *b* (рис. 2.20 а) при условии, что в отсутствие сигнала электронный луч попадет в центр экрана осциллографа. Очень просто измеряется сдвиг фаз между двумя напряжениями с помощью двухлучевого осциллографа (рис. 2.20 б). Для этого отрезок АВ делят на отрезок АС и умножают на  $2\pi$ .

### 2.13. Получение вольт-амперной характеристики двухполюсника (резистора, диода, стабилитрона) на экране осциллографа

Напомним, что *вольт-амперной характеристикой* называют зависимость силы протекающего через элемент тока от приложенного к нему напряжения. При этом напряжение должно изменяться по величине и полярности.

Для получения **вольт-амперной характеристики (ВАХ) резистора** на экране осциллографа необходимо, чтобы отклонение луча по оси “У” осциллографа было пропорционально току, протекающему через резистор, а по оси “Х” – напряжению на его концах. Отклонение луча по оси “У” осциллографа проградуировано в вольтах на деление. Если параллельно входу “У” подключить известный резистор небольшого сопротивления, то, зная падение напряжения на этом резисторе, можно определить протекающий через него ток. Поэтому можно проградуировать вход “У” в миллиамперах на деление, если напряжение снимается с эталонного резистора  $R_{эт}$  (резистора известного сопротивления).

Пусть нам необходимо получить по оси У коэффициент отклонения 1мА/дел. Рассчитаем, чему должно быть равно сопротивление эталонного резистора. В осциллографе необходимо выбрать наименьший коэффициент отклонения в В/дел по оси У. Это следует из общего требования к приборам для измерения тока (падение напряжения на амперметре должно быть как можно меньше, чтобы не изменять режим работы исследуемой цепи). Для осциллографа ОМЛ-3М минимальный коэффициент отклонения 0,01 В/дел. Из закона Ома для участка цепи следует, что  $R_{эт}$  равно частному от деления коэффициента

отклонения по напряжению на коэффициент отклонения по току.

$$\text{В нашем случае } R_{эт} = \frac{0,01 \text{ В/дел}}{0,001 \text{ А/дел}} = 10 \text{ Ом}$$

Для наблюдения вольт-амперной характеристики резистора на экране осциллографа последовательно с исследуемым резистором подключают эталонный резистор  $R_{эт}$  (резистор известного сопротивления). Возможны две схемы подключения (рис. 2.22 а, 2.22 б). Рассмотрим схему рисунка 2.21а. В ней корпус осциллографа подключен к точке соединения резисторов  $R_{эт}$  и R. Напряжение с резистора  $R_{эт}$  подается на вход “У” осциллографа, а напряжение с исследуемого резистора R подается на вход “Х” осциллографа. В схеме рисунка 2.21б корпус осциллографа подключается к нижнему (по схеме) выводу резистора  $R_{эт}$ , вход “У” – к точке соединения эталонного и исследуемого резисторов, а вход “Х” – к верхнему (по схеме) выводу исследуемого резистора.

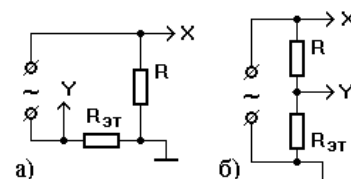


Рис. 2.21

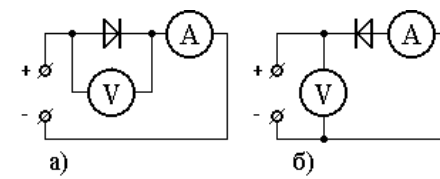


Рис. 2.22

ВАХ резистора представляет собой прямую линию, которая на экране осциллографа может располагаться в любом из квадрантов в зависимости от схемы подключения осциллографа и от того, куда отклоняется электронный луч осциллографа при подаче на его вход положительного потенциала относительно корпуса. Пусть, например, в осциллографе при подаче на входы “У” и “Х” положительного потенциала относительно корпуса смещение луча происходит вверх и вправо (чаще всего в осциллографах реализован именно такой вариант). Тогда ВАХ резистора, получаемая с помощью схемы рис. 2.21а, будет расположена во втором и четвертом квадрантах.

Если в осциллографе не предусмотрена регулировка коэффициента отклонения по оси Х, то на вход Х ставят переменный резистор, включая его по схеме потенциометра (рис. 2.25).

Теперь рассмотрим получение вольт-амперной характеристики диода – сначала по точкам, а затем – на экране осциллографа. При снятии **ВАХ диода по точкам** необходимо учитывать способы подключения амперметра и вольтметра в зависимости от сопротивления участка цепи, на котором измеряют ток и напряжение. При снятии по точкам прямой ветви вольт-амперной

характеристики диода измерительные приборы подключают по схеме рисунка 2.22а, так как внутреннее сопротивление вольтметра значительно больше прямого сопротивления диода. Для снятия начального участка ВАХ диода необходимо использовать вольтметр с большим внутренним сопротивлением (более 1 МОм), так как в противном случае погрешность измерений оказывается весьма существенной за счет больших токов, протекающих через вольтметр (сравнимых с токами, протекающими через диод).

При снятии по точкам обратной ветви вольт-амперной характеристики диода измерительные приборы подключают по схеме рисунка 2.22 б. Так как внутреннее сопротивление амперметра значительно меньше обратного сопротивления диода и напряжение  $U_B$ , измеряемое вольтметром, будет примерно равно напряжению на диоде  $U_D$ . В выражении  $U_B = U_D + U_a$  можно пренебречь величиной напряжения на миллиамперметре  $U_a$  по сравнению с величиной  $U_D$ .

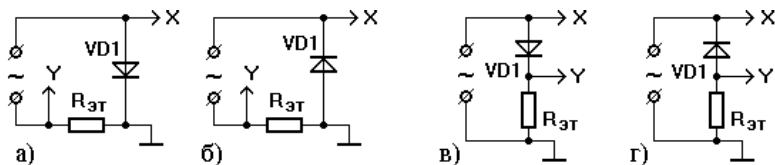


Рис. 2.23

Схему рисунка 2.22б можно использовать и для снятия прямой ветви ВАХ диода, если внутреннее сопротивление миллиамперметра будет существенно меньше прямого сопротивления диода. Схему рисунка 2.22а можно использовать и для снятия обратной ветви ВАХ диода, если внутреннее сопротивление вольтметра будет существенно больше обратного сопротивления диода. В этом случае изменить схему рисунка 2.22б для снятия прямой ветви, а схему рисунка 2.22а для снятия обратной ветви ВАХ диода можно двумя способами: либо изменяя полярность источника питания, либо изменяя полярность подключения исследуемого диода.

Преобразуем рассмотренные схемы в схемы для получения **ВАХ диода на осциллографе**. Роль миллиамперметра будет выполнять вход Y с эталонным резистором, а роль вольтметра – вход X. На экране осциллографа обычно наблюдают одновременно прямую и обратную ветви ВАХ диода, используя для этого переменное напряжение. Соответственно получаются 4 варианта подключения приборов для наблюдения ВАХ диода на экране осциллографа (рис. 2.23).

Осциллограммы, получающиеся для каждого варианта подключения диода и эталонного резистора, приведены на рисунке 2.24. Эти осциллограммы соответствуют стандартному подключению каналов X и Y осциллографа, когда при подаче относительно корпуса положительного потенциала на вход X

осциллографа отклонение луча происходит вправо, а при подаче положительного потенциала на вход Y луч отклоняется вверх.

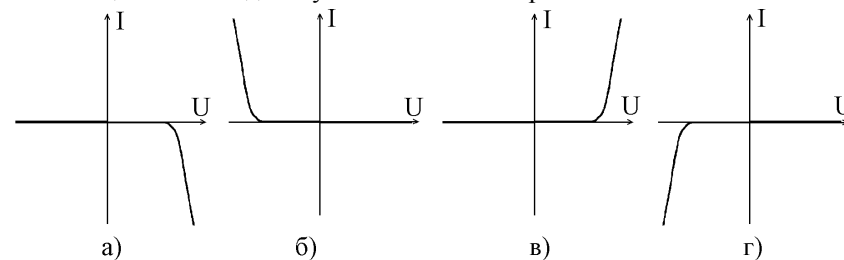


Рис. 2.24

Рассмотрим особенности наблюдения **ВАХ полупроводникового стабилитрона** на экране осциллографа ОМЛ-3М. *Стабилитрон* – это специальный полупроводниковый диод, в котором используется обратная ветвь характеристики в области лавинного пробоя. Обратная ветвь вольт-амперной характеристики стабилитрона – это зависимость тока, протекающего через обратн смещенный p-n переход стабилитрона, от приложенного к нему напряжения. Напряжение стабилизации стабилитронов равно единицы и десятки вольт (более подробные сведения о стабилитронах приведены в главе 3). Коэффициент отклонения по оси X у осциллографа ОМЛ-3М не регулируется и равен примерно 0,35 В/дел. По горизонтали на экране осциллографа 8 делений, следовательно, максимальное напряжение, подаваемое на вход X осциллографа, не должно превышать 2,8 В. Поэтому для наблюдения ВАХ стабилитрона на экране осциллографа ОМЛ-3М (рис. 2.25) к входу X осциллографа необходимо подключить регулируемый делитель напряжения (переменный резистор, включенный по схеме потенциометра).

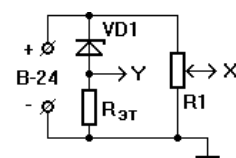


Рис. 2.25

Калибровку входа X осциллографа можно выполнить двумя способами. 1 способ: подать на вход регулируемого делителя известное постоянное напряжение, например, 12 В, и, вращая ось переменного резистора, добиться смещения электронного луча на необходимое число делений, например, на 6 делений. В этом случае коэффициент отклонения по оси X будет 2 В/дел. 2 способ: подать переменное напряжение одновременно на вход Y и на вход переменного резистора, подключенного ко входу X. Вращая ось переменного резистора, добиваются того, чтобы прямая располагалась под углом 45°. В этом случае коэффициенты отклонения по оси Y и оси X будут одинаковыми.

Калибровку входа X осциллографа можно выполнить двумя способами.

1 способ: подать на вход регулируемого делителя известное постоянное напряжение, например, 12 В, и, вращая ось переменного резистора, добиться смещения электронного луча на необходимое число делений, например, на 6 делений. В этом случае коэффициент отклонения по оси X будет 2 В/дел.

2 способ: подать переменное напряжение одновременно на вход Y и на вход переменного резистора, подключенного ко входу X. Вращая ось переменного резистора, добиваются того, чтобы прямая располагалась под углом 45°. В этом случае коэффициенты отклонения по оси Y и оси X будут одинаковыми.

### Глава 3. ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ И ИХ ИЗМЕРЕНИЕ

#### 3.1. Условные обозначения радиоэлементов на принципиальных схемах

переменный резистор, включенный как потенциометр		полупроводниковый диод	
переменный резистор, включенный как реостат		стабилитрон	
подстроечный резистор		варикап	
фоторезистор		тиристор	
терморезистор		симистор	
конденсатор постоянной емкости		фотодиод	
конденсатор электролитический полярный		светодиод	
конденсатор подстроечный		биполярный транзистор n-p-n структуры	
конденсатор переменной емкости		биполярный транзистор p-n-p структуры	
катушка без сердечника		полевой транзистор с управляющим p-n переходом с каналом n типа	
катушка с ферромагнитным сердечником		полевой транзистор с управляющим p-n переходом с каналом p типа	
катушка с указанным началом обмотки		полевой транзистор с изолированным затвором со встроенным каналом n типа	

#### Условные обозначения радиоэлементов на принципиальных схемах

полевой транзистор с изолированным затвором со встроенным каналом p типа		электрическая лампочка	
полевой транзистор с изолированным затвором с индуцированным каналом n типа		гальванический элемент	
полевой транзистор с изолированным затвором с индуцированным каналом p типа		батарея гальванических элементов	
логический элемент 2И-НЕ		цифровой индикатор семисегментный	
логический элемент 2ИЛИ-НЕ		цифровой индикатор неоновый	
логический элемент НЕ		громкоговоритель	
кнопка		телефон	
переключатель		микрофон	
переключатель галетный		плавкий предохранитель	
амперметр		электромагнитное реле	
вольтметр		разъем высокочастотный с коаксиальными кабелями	
омметр		операционный усилитель	

## 3.2. Предохранители

### 1. Общие сведения. Характеристики

Назначение *предохранителей* состоит в отключении потребителя от источника электрической энергии при протекании через него тока выше допустимого. Наибольшее распространение получили плавкие предохранители, защищающие установки от токов короткого замыкания. Их основной элемент представляет собой плавкую вставку, как правило, из цинка или луженой меди, которая перегорает при протекании большого тока, в результате чего цепь разрывается.



Рис. 3.1

Плавкая вставка выполняется в виде проволоки (рис. 3.1) или плоской фигурной полоски (рис. 3.2). Она помещается внутрь изоляционной трубки (стеклянной, фарфоровой, фибровой и др.). Внешний вид предохранителя с плавкой вставкой, широко применяемого в бытовой аппаратуре, показан на рисунке 3.1. Такая конструкция обеспечивает не только электрическую, но и пожарную безопасность, поскольку предотвращает возможность возгорания окружающих предметов при перегорании плавкой вставки. В предохранителях, рассчитанных на большие токи, пространство внутри трубки засыпают сухим кварцевым песком и мелом, что способствует быстрому охлаждению и гашению дуги.

Для предохранителей можно построить *защитную характеристику* – за-

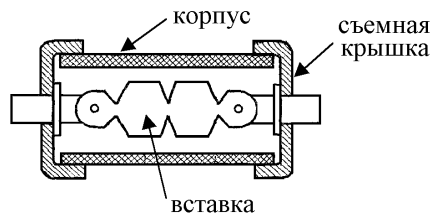


Рис. 3.2

висимость времени срабатывания предохранителя от силы протекающего через него тока (рис. 3.3). Минимальный ток срабатывания называется пограничным током. Номинальным током предохранителя  $I_n$  называется максимальный ток, при котором предохранитель может работать, не перегорая в течение длительного времени (несколько лет).

### 2. Проверка исправности и замена предохранителей

После перегорания плавкой вставки предохранитель не выполняет своих функций и требует замены. Заменять можно как предохранитель целиком, так

и его вставку. Обычно предохранители, рассчитанные на большие токи, предусматривают возможность замены плавкой вставки, а предохранители на малые токи заменяют целиком. Для самостоятельной замены проволоки внутри предохранителя надо провести ее *калибровку*. Для этого удобнее всего воспользоваться выпрямителем В-24. Берут небольшой отрезок проволоки, очищают его концы от окислов (для изготовления плавких вставок предохранителей целесообразно использовать залуженные проводники) и помещают между выводами "+", "-" выпрямителя. Перед включением выпрямителя ручка регулятора его напряжения должна быть повернута до отказа против часовой стрелки. Постепенно и очень медленно увеличивая подаваемое напряжение, наблюдают за проволокой и показаниями амперметра, встроенного в корпус выпрямителя. Замечают, при какой силе тока проволока перегорает. Таким образом прибли-

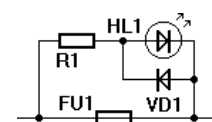


Рис. 3.4

зительно определяют пограничный ток. Точно такую же проволоку можно использовать в качестве плавкой вставки предохранителя на номинальный ток чуть меньше пограничного.

После того, как изготовлена новая вставка в предохранитель, необходимо проверить его исправность. Для этого с помощью омметра определяют его сопротивление. Сопротивление исправного предохранителя должно быть близко к нулю.

При большом числе предохранителей в электронном устройстве можно установить индикаторы перегорания предохранителей. Схема простого индикатора перегорания предохранителя приведена на рисунке 3.4. Этот индикатор может работать в цепях как постоянного, так и переменного тока. В нормальном режиме напряжение на предохранителе очень мало и светодиод HL1 не горит. При сгорании предохранителя ток нагрузки начинает протекать через светодиод, который загорается, сигнализируя о перегорании предохранителя. Резистор R1 служит для ограничения тока, протекающего через светодиод. Его сопротивление рассчитывают, исходя из того, что при номинальной нагрузке через светодиод целесообразно пропускать ток 5-10 мА, а в режиме короткого замыкания нагрузки он не должен превышать максимально допустимый.

### 3. Автоматические выключатели

Неудобство плавких предохранителей состоит в том, что после каждой аварийной ситуации необходимо заменять плавкую вставку или сам предохранитель. Поэтому для защиты от короткого замыкания и токов перегрузки часто применяют автоматические выключатели, которые можно привести в рабочее состояние без замены каких-либо деталей.

Рассмотрим принцип работы автоматической пробки, широко применяемой в быту. Она включает в себя электротермический и электромагнитный предохранители. На рисунке 3.5 приведена схема, поясняющая принцип ее работы. В рабочем состоянии электрический ток протекает по цепи: фазный провод ф, неподвижные 9 и подвижные 8 контакты (замкнутые между собой), биметаллическая пластина 1, гибкий проводник 3, обмотка электромагнита 5, электрические лампочки, нулевой провод 0 питающей сети. Если в течение нескольких десятков секунд сила тока, протекающего в цепи, превышает максимально допустимое значение, то биметаллическая пластина 1, изгибаясь влево, освобождает левый конец рычага 2, удерживающего изолирующий толкатель 7 с подвижными контактами 8.

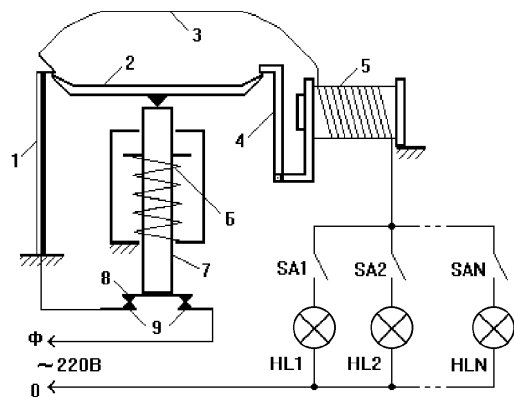


Рис. 3.5

В результате контакты 8 и 9 размыкаются и ток в цепи прекращается. При коротком замыкании цепи происходит практически мгновенное отключение нагрузки за счет того, что якорь 4, притягиваясь к сердечнику электромагнита 5, освобождает правый конец рычага 2. Для возвращения пробки в исходное рабочее состояние необходимо с помощью кнопки (на рисунке кнопка не показана) рычаг с толкателем опустить вниз так, чтобы он был захвачен защелками биметаллической пластины и якоря электромагнита и сжал пружину 6.

В последнее время для низковольтных цепей постоянного тока применяют электронные предохранители. Схема одного из вариантов электронного предохранителя приведена на рисунке 3.6а. При нормальном режиме работы открыт транзистор VT2 за счет протекания тока базы по цепи: плюс источника питания, резистор R1, база-эмиттер транзистора VT2, минус источника. При увеличении тока увеличивается напряжение между коллектором и эмиттером транзистора VT2 и при напряжении примерно 0,5 В начинает открываться транзистор VT1. Открытие транзистора VT1 приводит к закрытию транзистора VT2.

Если в нагрузке произошло короткое замыкание, то ток короткого замыкания протекает по цепи: плюс источника питания, короткозамкнутая нагрузка, резистор R2, переход база-эмиттер транзистора VT1, минус источника. Так как транзистор VT2 в этом случае закрыт, то ток короткого замыкания ограничен

резистором R2. После устранения короткого замыкания предохранитель самостоятельно не переходит в нормальное состояние. Для этого необходимо либо на короткое время замкнуть между собой выводы базы и эмиттера транзистора VT1, либо отключить и снова подключить нагрузку. В этом случае транзистор VT1 закроется, транзистор VT2 откроется и напряжение будет подано на нагрузку.

На рисунке 3.6б приведена схема устройства, ограничивающего токи большие номинального. Величина номинального тока определяется сопротивлением резистора R2. При напряжениях на резисторе R3 более 0,5 В начинает открываться транзистор VT2, транзистор VT1 закрывается и ток нагрузки ограничивается. При сопротивлении резистора R3 10 Ом ограничение тока нагрузки происходит при 50 мА. После устранения перегрузки нормальная работа устройства восстанавливается автоматически.

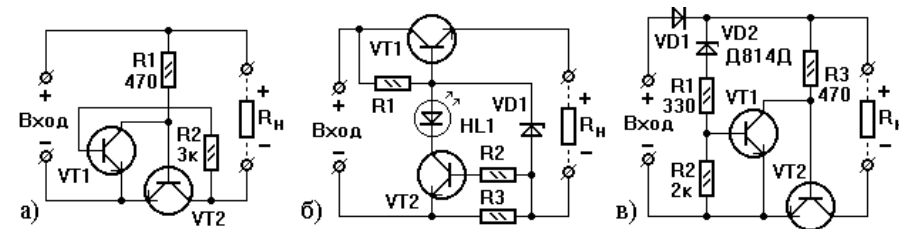


Рис. 3.6

На рисунке 3.6в приведена схема для защиты потребителей от перенапряжения в низковольтных цепях постоянного тока. Такая защита необходима в учебных лабораториях, чтобы при использовании регулируемых источников постоянного напряжения не вывести электронные устройства за счет превышения номинального питающего напряжения. При увеличении входного напряжения выше номинального пробивается стабилитрон VD2, открывается транзистор VT1, закрывается VT2 и обеспечивается защита нагрузки от перенапряжения.

### 3.3. Резисторы

#### 1. Общие сведения. Характеристики

**Резисторы** могут быть постоянными (сопротивление которых нельзя изменить) и переменными (сопротивление которых можно менять от нуля до некоторого максимального значения).

По конструкции различают пленочные, объемные и проволочные резисторы. В зависимости от материала, из которого выполняется токопроводящий (резистивный) элемент, резисторы подразделяются на углеродистые,

металлопленочные, металлооксидные, металлодиэлектрические, композиционные и полупроводниковые. Резисторы, выполненные из полупроводниковых материалов, в отличие от остальных, характеризуются нелинейной вольт-амперной характеристикой.

Основной характеристикой резисторов является их **номинальное сопротивление** - значение сопротивления, которое должен иметь резистор в соответствии с нормативной документацией. Фактическое же значение сопротивления каждого резистора может отличаться от номинального. Выраженное в процентах отклонение фактического значения сопротивления от номинального называется допуском. Оно определяет класс точности резистора:

- 1 класс - отклонение  $\pm 5 \%$ ,
- 2 класс - отклонение  $\pm 10 \%$ ,
- 3 класс - отклонение  $\pm 20 \%$ .

Постоянные резисторы имеют ограниченное число номинальных значений. Для каждого из классов они образуют ряды из 24 (для 1 класса), 12 (для 2 класса) и 6 (для 3 класса) чисел.

Для резисторов с меньшими допустимыми отклонениями установлены ряды номинальных значений из 48, 96 и 192 чисел.

Эти ряды представляют собой геометрическую прогрессию со знаменателем  $q_n$ , равным: для ряда 6  $q_6 = \sqrt[6]{10} = 1,47$ ; для ряда 12  $q_{12} = \sqrt[12]{10} = 1,21$ ; для ряда 24  $q_{24} = \sqrt[24]{10} = 1,1$ ; для ряда 48  $q_{48} = \sqrt[48]{10} = 1,05$ ; для ряда 96  $q_{96} = \sqrt[96]{10} = 1,025$ ; для ряда 192  $q_{192} = \sqrt[192]{10} = 1,012$ .

Для резисторов третьего класса точности номинальные значения сопротивления образуют следующий ряд чисел: 10, 15, 22, 33, 47, 68. Для резисторов второго класса точности в этот ряд входят еще шесть чисел: 12, 18, 27, 39, 56, 82. У резисторов первого класса ряд номинальных значений образует 24 числа. К ряду для второго класса добавляются следующие числа: 11, 13, 16, 20, 24, 30, 36, 43, 51, 62, 75, 91. Конкретные значения сопротивлений получают умножением соответствующих чисел рядов на  $10^n$ , где  $n$  - любое целое число.

Следует помнить, что допустимые отклонения указываются для определенной температуры и влажности.

Следующая важная характеристика резисторов - **номинальная мощность рассеяния** - максимально допустимая мощность, которая может быть рассеяна (выделена) на резисторе при сохранении его параметров в установленных пределах в течение длительного времени (срока службы). Этот параметр связан с выделением в проводнике теплоты при протекании по нему электрического

тока. Количество выделяющейся в проводнике теплоты по закону Джоуля-Ленца прямо пропорционально квадрату силы тока, сопротивлению резистора и времени протекания тока. Эта теплота рассеивается в окружающую среду. Чем больше площадь поверхности резистора, тем быстрее отводится тепло и тем меньше он нагревается. Если теплоотвод осуществляется плохо, то возможно изменение сопротивления резистора и даже его сгорание.

В зависимости от геометрических размеров резисторы могут иметь мощность рассеяния от 0,01 до 500 Вт. На условных обозначениях мощность рассеяния показывается с помощью горизонтальных, вертикальных и наклонных линий внутри прямоугольника резистора (рис. 3.7).

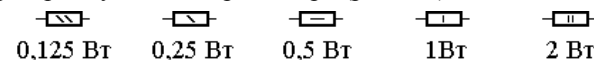


Рис. 3.7

**Температурный коэффициент сопротивления (ТКС)** - это параметр, характеризующий относительное изменение сопротивления резистора при изменении температуры окружающей среды на  $1^\circ\text{C}$ .

**Частотные свойства резисторов** определяются тем, что кроме активного сопротивления они обладают и реактивным сопротивлением (емкостным и индуктивным), которое зависит от формы и строения резистора. В связи с этим полное сопротивление резисторов зависит от частоты протекающего по ним переменного тока.

К характеристикам резисторов относятся также их электрическая прочность и уровень собственных шумов.

На корпусах резисторов указывается их номинальное сопротивление, класс точности (допустимые отклонения сопротивления от номинального) и тип резистора. Сопротивления до 100 Ом выражаются в омах, вместо запятой десятичной дроби ставится буква R, E или ничего не ставится. Сопротивления от 100 Ом до 100 кОм выражаются в килоомах и вместо запятой десятичной дроби ставится буква K. Сопротивления от 100 кОм до 100 МОм выражаются в мегаомах и вместо запятой десятичной дроби ставится буква M.

Например, 4,7 Ом - 4E7; 47 Ом - 47 E; 4,7 кОм - 4K7; 47 кОм - 47 K; 0,47 МОм - M47; 4,7 МОм - 4M7; 47 МОм - 47 M.

Допустимые отклонения сопротивления от номинального обозначаются буквами:

допуск, %	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,5$	$\pm 1$	$\pm 2$	$\pm 5$	$\pm 10$	$\pm 20$
буква кода	Ж	У	Д	Р	Л	И	С	В

В последнее время все чаще применяют цветовую маркировку постоянных резисторов. Она представляет собой совокупность точек или круговых полос, нанесенных на поверхность резистора. Эти точки и полосы ставятся вместо цифр, обозначающих номинальное сопротивление резистора и допустимое отклонение его сопротивления от номинального. Перед применением цветового кода номинальное сопротивление выражают в омах двумя или тремя цифрами (последняя из которых не должна равняться нулю) и множителем  $10^n$ , где  $n$  – любое целое число от -2 до +9.

Маркировочные знаки располагают на резисторе слева направо в следующем порядке:

первый знак - первая цифра в значении сопротивления;

второй знак - вторая цифра;

третий знак - третья цифра (или множитель, если значение номинального сопротивления выражено двумя цифрами);

четвертый знак - множитель (или допускаемое отклонение);

пятый знак - допускаемое отклонение.

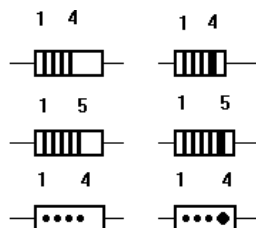


Рис. 3.8

Приняты следующие цвета маркировочных знаков:

Цвет знака	Номинальное сопротивление, Ом				Допускаемое отклонение, %
	Первая цифра	Вторая цифра	Третья цифра	Множитель	
Серебристый	-	-	-	$10^{-2}$	$\pm 10$
Золотистый	-	-	-	$10^{-1}$	$\pm 5$
Черный	-	0	-	1	-
Коричневый	1	1	1	10	$\pm 1$
Красный	2	2	2	$10^2$	$\pm 2$
Оранжевый	3	3	3	$10^3$	-
Желтый	4	4	4	$10^4$	-
Зеленый	5	5	5	$10^5$	$\pm 0,5$
Голубой	6	6	6	$10^6$	$\pm 0,25$
Фиолетовый	7	7	7	$10^7$	$\pm 0,1$
Серый	8	8	8	$10^8$	$\pm 0,05$
Белый	9	9	9	$10^9$	-

Маркировочные знаки наносят ближе к одному из торцов резистора. Первым считается знак, расположенный рядом с торцом. Если длина резистора не позволяет сдвинуть маркировку к одному из концов, то последний знак делают в 1,5 раза крупнее остальных (рис. 3.8).

**Переменные резисторы** характеризуются следующими основными величинами сопротивления:

- полное сопротивление – сопротивление между крайними выводами резистивного элемента;
- установленное сопротивление – сопротивление между одним из крайних выводов резистивного элемента и выводом подвижного контакта.

Функциональная характеристика переменного резистора определяет зависимость его установленного сопротивления от положения подвижного контакта. По характеру функциональной зависимости переменные резисторы разделяются на линейные (типа А) и нелинейные (логарифмические (Б), обратно-логарифмические (В) и др.).

Для определения среднего вывода переменного резистора нужно омметр подключать поочередно к двум различным выводам и наблюдать изменение сопротивления при вращении оси резистора. Необходимо найти два таких вывода, сопротивление между которыми не изменяется при вращении оси резистора. Тогда третий вывод будет средним.

## 2. Измерение сопротивления

Иногда в практике возникают ситуации, когда по маркировке на резисторе трудно определить его сопротивление. Тогда сопротивление измеряют. Для этого существуют различные способы. Рассмотрим основные из них: использование омметра, метод амперметра-вольтметра, мостовой метод.

Измерение сопротивлений с помощью **омметра** рассмотрено в приложении (ампервольтметр АВО-63), а принцип работы омметра в главе 2.

Метод **амперметра-вольтметра** для измерения активных сопротивлений описан в главе 2 при рассмотрении способов подключения электроизмерительных приборов к участку цепи в зависимости от его сопротивления.

Измерение сопротивлений с помощью **мостика Уитстона** основано на балансировке электрической цепи, схема которой изображена на рисунке 3.9. Мостик состоит из трех резисторов сопротивлением  $R$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ , которые вместе с резистором или прибором неизвестного сопротивления  $R_x$  образуют четырехугольник ABCD. В одну из диагоналей четырехугольника включается источник постоянного тока, в другую – магнитоэлектрический гальванометр с нулем посередине (индикатор нуля).

В качестве резистора  $R$  обычно используется магазин сопротивлений, в качестве резисторов  $R_1$  и  $R_2$  – реохорд (рис. 3.9) или градуированный переменный резистор с линейной зависимостью сопротивления от угла поворота оси резистора (рис. 3.10 б). Сопротивления резисторов  $R$ ,  $R_1$ ,  $R_2$

подбирают так, чтобы при замыкании ключей ток в цепи гальванометра отсутствовал. Пусть  $I_1$  – сила тока, протекающего через резисторы  $R_x$  и  $R$ , а  $I_2$  – сила тока, протекающего через резисторы  $R_1$  и  $R_2$ . При отсутствии тока через гальванометр потенциалы точек В и D одинаковы. Поэтому разности потенциалов на участках АВ и AD, а также на участках ВС и DC попарно равны:  $I_1 R_x = I_2 R_1$  и  $I_1 R = I_2 R_2$ . Разделив почленно первое равенство на второе, получим:  $R_x = R R_1 / R_2$ . Если в качестве резисторов  $R_1$  и  $R_2$  используется реохорд, то отношение сопротивлений  $R_1 / R_2$  можно заменить отношением длин частей реохорда  $L_1 / L_2$ . Тогда получим  $R_x = R L_1 / L_2$ .

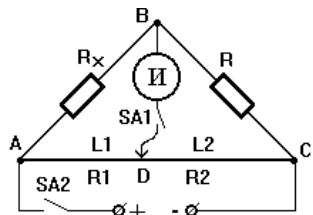


Рис. 3.9

При проведении измерений устанавливают движок реохорда или переменного резистора примерно в среднее положение. На магазине устанавливают некоторое ненулевое сопротивление. Сначала замыкают цепь источника, затем на короткое время замыкают цепь гальванометра. Изменяя сопротивление магазина, добиваются, чтобы ток через гальванометр почти полностью прекратился. Далее, плавно перемещая движок реохорда, точнее устанавливают стрелку гальванометра на нуль. После этого определяют сопротивления  $R$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  и вычисляют сопротивление  $R_x$ .

Если в распоряжении исследователя имеются три магазина сопротивлений, то их можно использовать в качестве всех известных резисторов –  $R$ ,  $R_1$  и  $R_2$  (рис. 3.10а). Удобно установить одинаковыми сопротивления резисторов  $R$  и  $R_2$ . Тогда при балансе моста сопротивление резистора  $R_x$  равно сопротивлению магазина  $R_1$ .

Описанный мост (он называется одинарным четырехплечным) применяют для измерения больших сопротивлений, от десятков ом и выше; при измерении малых сопротивлений возникают погрешности, обусловленные влиянием соединительных проводов и сопротивлений контактов.

### 3.4. Конденсаторы

#### 1. Общие сведения. Характеристики

Электрический конденсатор представляет собой систему из двух проводни-

ков электрического тока (обкладок), разделенных диэлектриком. Основной характеристикой конденсатора является его *электрическая емкость*, или просто емкость, которая характеризует способность конденсатора накапливать электрический заряд. Емкость конденсатора определяется отношением накапливаемого на одной из обкладок электрического заряда к приложенному напряжению:  $C = q / U$ . Она зависит от материала диэлектрика, формы и взаимного расположения обкладок.

В цепях постоянного тока конденсатор не проводит электрический ток, поскольку между его обкладками находится диэлектрик. В цепях переменного тока с конденсатором протекают токи его перезарядки. Емкостное сопротивление конденсатора обратно пропорционально частоте переменного тока и емкости, измеряется оно в омах.

Существуют конденсаторы постоянные (емкость которых нельзя изменить), полупеременные (подстроечные) и переменные. По роду диэлектрика выделяют бумажные, металобумажные, пленочные, металлопленочные, слюдяные, керамические, стеклоэмалевые и воздушные конденсаторы.

Особый тип конденсаторов – электролитические. В них в качестве диэлектрика используется слой оксида, образованный на металле, выступающем одной из обкладок конденсатора. Второй обкладкой является жидкий или пастообразный электролит. Электролитические конденсаторы обладают малыми размерами, большой емкостью, но и большими потерями энергии. При включении электролитических конденсаторов в цепь необходимо соблюдать полярность!

**Номинальная емкость конденсатора** – это емкость, которую он должен иметь в соответствии с нормативной документацией. Отличие фактической емкости конденсатора от номинальной не может быть больше допустимой. Как и для резисторов номинальные емкости конденсаторов с допустимыми отклонениями  $\pm 5\%$ ,  $\pm 10\%$ ,  $\pm 20\%$  выбираются из рядов умножением соответствующих чисел на  $10^n$ , где  $n$  – любое целое число.

**Номинальное рабочее напряжение** – это максимальное напряжение, при котором конденсатор может надежно работать в течение минимальной наработки в условиях, указанных в технической документации.

**Температурный коэффициент емкости** – параметр, характеризующий относительное изменение емкости при изменении температуры окружающей среды на  $1^\circ \text{C}$ .

При прохождении электрического тока в конденсаторе возникают **потери энергии**, обусловленные проводимостью диэлектрика, нагревом металлических элементов, контактов в местах соединений и др. Мощность потерь в

конденсаторе прямо пропорциональна его реактивной мощности ( $P_p = U^2 \omega C$ ) и тангенсу угла потерь  $\operatorname{tg} \delta$ . Величина, обратная  $\operatorname{tg} \delta$ , называется **добротностью конденсатора**. Чем больше добротность конденсатора, тем меньше потери энергии в нем (при прочих равных условиях).

Для учета потерь реальный конденсатор представляют последовательной (рис. 3.11 а) или параллельной (рис. 3.11 б) схемой замещения. Последовательная

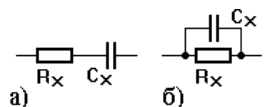


Рис. 3.11

схема применяется при незначительных потерях в диэлектрике; при больших потерях в диэлектрике применяют параллельную схему замещения. Чаще всего пользуются именно параллельной схемой замещения. В этом случае тангенс угла потерь равен отношению активной составляющей тока к реактивной (или активной проводимости к реактивной).

На корпусах конденсаторов достаточно большого размера обозначается тип, номинальная емкость, максимальное рабочее напряжение и допустимое отклонение емкости от номинального значения.

Емкости до 100 пФ выражаются в пикофарадах и обозначаются буквой П (р); емкости от 100 пФ до 0,1 мкФ - в нанофарадах и обозначаются буквой Н (н); емкости выше 0,1 мкФ - в микрофарадах и обозначаются буквой М (μ). Как и для резисторов буквы ставятся вместо запятой десятичной дроби, которая выражает значение емкости. Если емкость выражена целым числом, то буква ставится после него; если емкость конденсатора меньше единицы, то буква ставится вместо нуля и запятой перед цифрами.

Допустимые отклонения емкости от номинального значения указаны такими же буквами, как и для резисторов.

## 2. Измерение емкости конденсаторов

Существуют различные методы измерения емкости: метод амперметра-вольтметра, мостовой метод, метод баллистического гальванометра, по времени разряда конденсатора через резистор известного сопротивления, резонансный метод и др. Рассмотрим их более подробно.

Одним из наиболее простых является **метод амперметра-вольтметра**. Он основан на измерении емкостного сопротивления конденсатора, которое обратно пропорционально емкости и частоте электрического тока:

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C_x} = \frac{U_C}{I},$$

откуда 
$$C_x = \frac{I}{\omega \cdot U_C}$$

Следовательно, для измерения емкости этим методом необходимо знать частоту напряжения, подаваемого от источника питания.

Как и в случае измерения активного сопротивления в зависимости от величины емкостного сопротивления может быть использована одна из схем подключения приборов (рис. 3.12 а, 3.12 б). При больших емкостях, то есть малых емкостных сопротивлениях, меньше погрешность измерения при использовании схемы 3.12а; при измерении малых емкостей, то есть больших емкостных сопротивлений, лучше пользоваться схемой 3.12б.

Рассмотрим, какая минимальная емкость может быть измерена этим методом при использовании напряжения частотой 50 Гц. Пусть, например, имеется измерительный прибор, позволяющий измерить с достаточной точностью ток величиной 0,1 мА, а напряжение, приложенное к конденсатору – 30 В. Тогда минимальная измеряемая емкость 0,01 мкФ. Если требуется измерить меньшую емкость, необходимо использовать переменное напряжение более высокой частоты. Так, при частоте 5 кГц и тех же значениях тока и напряжения минимальная измеряемая емкость составляет 100 пФ.

Одной из разновидностей метода вольтметра-амперметра является **метод двух вольтметров**, используемый для измерения малых емкостей (рис. 3.12в). Вольтметром  $V_1$  измеряется напряжение питания, а вольтметром  $V_2$  - напряжение на конденсаторе известной емкости  $C_0$ :

$$U_2 = I \cdot X_{C_0} = \frac{I}{\omega \cdot C_0}$$

Сила тока  $I$  в неразветвленной цепи равна:

$$I = \frac{U_1}{\frac{1}{\omega \cdot C_x} + \frac{1}{\omega \cdot C_0}},$$

отсюда

$$C_x = \frac{C_0 \cdot U_2}{U_1 - U_2}$$

Емкость конденсатора  $C_0$  должна быть значительной (сопротивление его мало), чтобы вольтметр  $V_2$  вносил незначительные изменения в электрическую цепь. При  $C_0 \gg C_x$  выражение для расчета емкости можно упростить:

$$C_x = \frac{C_0 \cdot U_2}{U_1}$$

**Мостовой метод** аналогичен соответствующему методу измерения активного сопротивления. Схема четырехплечного моста переменного тока приведена на рисунке 3.13. В качестве указателя равновесия (индикатора нуля И) могут использоваться осциллографы, вибрационные гальванометры и др.

Условие равновесия моста в этом случае записывается в комплексной

форме:  $Z_x Z_2 = Z Z_1$ , где сопротивления плеч  $Z_i$  в общем случае представляют собой комплексные сопротивления вида  $Z_i = R_i + j X_i$ .

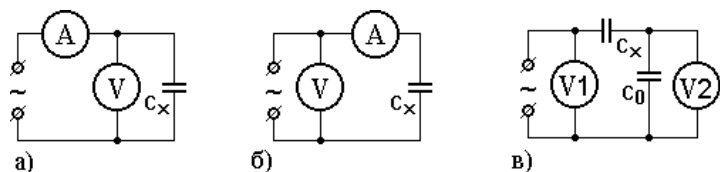


Рис. 3.12

Если в двух смежных плечах включены активные сопротивления, то в двух других смежных плечах должны быть обязательно сопротивления одного характера – индуктивности, или емкости (рис. 3.14). Если активные сопротивления включены в противоположные плечи, то в два других противоположных плеча необходимо включить разные по характеру сопротивления: в одно плечо – индуктивность, в другое – емкость (рис. 3.21).



Рис. 3.13

Рис. 3.14

На рисунке 3.14 приведена мостовая схема для измерения емкости с использованием параллельной схемы замещения реального конденсатора. В качестве эталонного конденсатора  $C_1$  обычно используется воздушный конденсатор с малыми потерями. В этом случае условие равновесия моста (1) запишется в виде:

$$\frac{R_2}{1/R_x + j\omega C_x} = \frac{R}{1/R_1 + j\omega C_1}$$

$$R_2(1/R_1 + j\omega C_1) = R(1/R_x + j\omega C_x)$$

Разделив вещественную и мнимую части (напомним, если равны два выражения, то можно приравнять их вещественные и мнимые части), получим выражения для емкости конденсатора и его активного сопротивления:

$$C_x = R_2 C_1 / R, \quad R_x = R R_1 / R_2.$$

Тангенс угла потерь определяется выражением:

$$\operatorname{tg} \delta_x = \frac{1}{\omega C_x R_x} = \frac{1}{\omega C_1 R_1}$$

Уравновешивание моста производят поочередным изменением сопротивления  $R_1$  и емкости  $C_1$ . Для расширения пределов измерения изменяют отношение  $R/R_2$ .

Рассмотрим использование **метода баллистического гальванометра**.

Баллистическими называют чувствительные гальванометры, у которых период собственных колебаний рамки очень большой. В баллистическом режиме может работать любой прибор магнитоэлектрической системы, если ток в цепи прибора протекает в течение времени, во много раз меньшего периода собственных колебаний его подвижной рамки. При разряде конденсатора через баллистический гальванометр отброс стрелки гальванометра пропорционален протекающему через него заряду. Проведем следующий эксперимент. Зарядим конденсатор до напряжения  $U$  и, разрядив его через гальванометр, заметим величину отброса стрелки (рис. 3.15а). Повторим опыт, увеличивая напряжение в 2, 3 и т.д. раз. Каждый раз отношение напряжения к числу делений, на которые отклонялась стрелка, будет величиной постоянной. Затем, не изменяя напряжения, проведем эксперимент с конденсаторами емкостью  $C$ ,  $2C$ ,  $3C$  и т.д. Обнаружим, что отношение емкости конденсатора к числу делений, на которые отклонилась стрелка, тоже величина постоянная.

Баллистическая постоянная гальванометра – это отношение заряда  $q$ , протекающего через рамку гальванометра, к числу делений  $n$ , на которое отклонилась стрелка:  $k = q/n$ . Для определения баллистической постоянной несколько раз проводят опыт с конденсаторами известной емкости. Заряд конденсатора рассчитывается по формуле  $q = CU$ , где  $q$  – заряд на одной из обкладок конденсатора,  $C$  – емкость конденсатора, а  $U$  – напряжение между обкладками конденсатора. Тогда  $k = CU/n$ . Из нескольких опытов при различных напряжениях

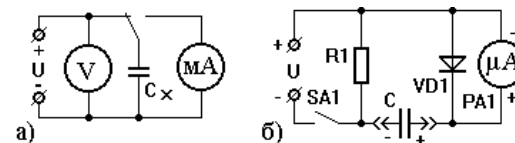


Рис. 3.15

между обкладками конденсатора и различных значениях емкости определяют среднее значение баллистической постоянной гальванометра.

Затем включают в цепь конденсатор неизвестной емкости и повторяют опыт. Зная баллистическую постоянную и число делений, на которое отклонилась стрелка гальванометра, определяют емкость:  $C_x = kn/U$ .

Для измерения емкости можно использовать любой прибор магнитоэлектрической системы при условии, что произведение емкости конденсатора на внутреннее сопротивление прибора будет значительно меньше периода собственных колебаний стрелки прибора. В этом случае конденсатор полностью разряжается за время, много меньшее периода собственных колебаний, и изменение сопротивления резистора, включенного последовательно с гальванометром, никак не влияет на отброс стрелки гальванометра.

Широко применяется способ измерения емкости конденсатора **по величине среднего значения силы разрядного тока** измеряемого конденсатора, периодически перезаряжаемого с частотой  $f$  (рис. 3.15 б).

При замкнутых контактах ключа SA1 исследуемый конденсатор  $C$  заряжается по цепи: плюс источника питания, полупроводниковый диод VD1, замкнутые контакты ключа, минус источника. При разомкнутом ключе ток разрядки конденсатора протекает по цепи: правая обкладка конденсатора, микроамперметр, резистор,  $R1$ , левая обкладка конденсатора. Диод VD1 (германиевый) выбирают так, чтобы напряжение на нем в прямом направлении было как можно меньше, тогда ток зарядки, протекающий через микроамперметр, очень мал. В некоторых устройствах для исключения тока зарядки конденсатора через микроамперметр последовательно с микроамперметром включают дополнительно диод, через который будет протекать ток разрядки конденсатора.

Время замкнутого и разомкнутого состояния ключа обычно выбирают равным. Постоянная времени  $RC$  разрядной цепи выбирается значительно меньше времени, в течение которого контакты ключа замкнуты, следовательно, конденсатор успевает полностью разрядиться. Заряд конденсатора определяется по формуле  $q = C \cdot U$ , а сила разрядного тока конденсатора  $I = q \cdot f = C \cdot U \cdot f$ , где  $f$  – частота включения и выключения ключа. В качестве ключа обычно используется ключ на биполярном транзисторе.



Рис. 3.16

Одной из разновидностей **резонансного метода** измерения емкости конденсаторов является метод с использованием двух генераторов высокой частоты (рис. 3.16). В колебательном контуре второго генератора высокой частоты используется эталонный конденсатор переменной емкости, а в колебательный контур первого генератора высокой частоты входит исследуемый конденсатор. Колебания высокой частоты с первого и второго генераторов подаются на смеситель, на выходе которого получают колебания разностной частоты. Пройдя через фильтр и усилитель низкой частоты, колебания подаются на индикаторы нулевых биений. Индикаторы нулевых биений позволяют определить равенство частот колебаний первого и второго генераторов. В качестве индикаторов нулевых биений достаточно часто используют одновременно головные телефоны и стрелочные измерительные приборы. Такой принцип работы имеет прибор Е12-1. Значение емкости измеряемого конденсатора определяется по специальной шкале.

Емкость электролитических конденсаторов (такие конденсаторы имеют значительную емкость) можно достаточно просто определить **по времени разряда до напряжения  $0,367U_0$**  (рис. 3.17а), где  $U_0$  – напряжение, до которого был первоначально заряжен конденсатор. Напряжение на конденсаторе при его разрядке изменяется по закону:  $U_c = U_0 e^{-t/(RC)}$ , где  $U_c$  – напряжение на конденсаторе в момент времени  $t$  при условии, что при  $t=0$  конденсатор был заряжен до напряжения  $U_0$  и начал разряжаться через резистор сопротивлением  $R$ . Если выбрать время разрядки конденсатора равным  $RC$ , то за это время напряжение между обкладками конденсатора уменьшится до  $0,367U_0$ . Зная сопротивление цепи, через которую

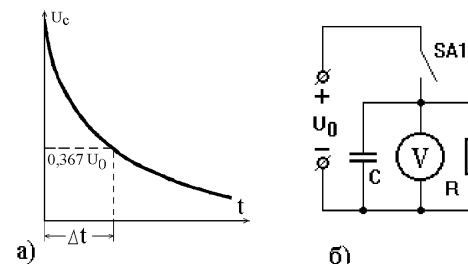


Рис. 3.17

разряжался конденсатор, и экспериментально определив время  $\Delta t$  его разрядки до напряжения  $0,367U_0$ , определим емкость конденсатора по формуле:  $C = \Delta t / R$ .

Для проведения опыта собирают электрическую цепь по схеме рисунка 3.17б. При замыкании ключа конденсатор заряжается до напряжения  $U_0$ . Измеряют время с момента размыкания ключа до момента установления на конденсаторе напряжения  $0,367 U_0$ . Сопротивление резистора  $R$  подбирается экспериментально, чтобы время разряда было 5-15 секунд (удобное для снятия показаний вольтметра). Если сопротивление резистора  $R$  много меньше внутреннего сопротивления вольтметра, то внутреннее сопротивление вольтметра можно не учитывать. В противном случае при подстановке в формулу для расчета емкости сначала рассчитывается общее сопротивление параллельно соединенных резистора и вольтметра.

Высокую точность обеспечивает **дискретный метод** измерения емкости конденсаторов (погрешность измерений составляет 0,1–0,2%). Структурная схема прибора, использующего этот метод, приведена на рисунке 3.18. Перед началом очередного цикла измерения устройство управления перебрасывает ключ в верхнее положение и конденсатор  $C_x$  заряжается через резистор  $R_{огр}$  от источника постоянного напряжения  $U$ . В момент начала измерения устройство управления обнуляет счетчик импульсов, переводит ключ в нижнее положение и устанавливает триггер в единичное состояние. Импульсы с генератора импульсов через схему совпадения (логический элемент 2И) поступают на счетчик импульсов. Конденсатор  $C_x$  разряжается через резистор  $R_{т}$  и, как только напряжение на нем станет равным  $U \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$ , компаратор переведет триггер

в нулевое состояние и импульсы перестанут поступать на счетчик импульсов. Емкость конденсатора  $C_x$  пропорциональна числу импульсов, поступивших на счетчик. Напряжение  $U$  должно быть стабильно в течение одного цикла измерения. Стабильность частоты генератора импульсов должна быть высокой.

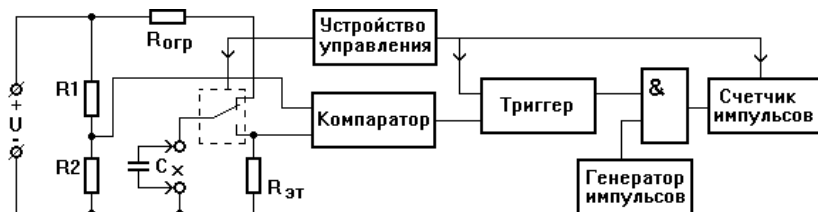


Рис. 3.18

Данным методом можно измерять и сопротивления резисторов, если применить эталонный конденсатор.

### 3. Проверка исправности конденсаторов

Неисправностями конденсатора являются: пробой диэлектрика конденсатора и внутренний обрыв его выводов. Пробой конденсатора легко обнаруживается с помощью омметра (сопротивление конденсатора будет мало). Внутренний обрыв выводов конденсатора обнаруживается только при измерении его емкости (в этом случае его емкость составляет, как правило, десятые доли или единицы пикофард).

## 3.5. Катушки индуктивности

### 1. Общие сведения. Характеристики

Вам известно, что проводник, намотанный на сердечник в виде *катушки*, в цепях переменного тока обладает индуктивным сопротивлением, которое зависит от частоты тока и геометрических характеристик проводника. **Индуктивность** выражает свойство проводника препятствовать изменению тока в нем, она характеризует количество энергии, запасенное проводником при протекании по нему электрического тока. Индуктивность зависит от формы, размеров, числа витков катушки и материала ее сердечника.

По конструкции выделяют цилиндрические, плоские (спиральные) и тороидальные катушки. Они могут быть одно- и многослойными, с сердечниками и без них, экранированными и нет.

Реальная катушка, кроме индуктивного сопротивления, всегда обладает активным сопротивлением, которое иногда называется сопротивлением потерь.

Поэтому используют схему замещения катушки, чаще всего последова-

тельную (рис. 3.19). Качество катушек характеризуют **добротностью** - отношением ее реактивного сопротивления к активному сопротивлению потерь.

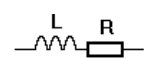


Рис. 3.19

**Температурный коэффициент индуктивности** равен отношению изменению индуктивности при изменении температуры окружающей среды на  $1^\circ\text{C}$ .

Паразитным параметром, обуславливающим увеличение потерь энергии в катушке, является ее собственная емкость.

### 2. Измерение индуктивности

Одним из методов измерения индуктивности является **метод вольтметра-амперметра**. При его использовании необходимо выполнение условия: активное сопротивление катушки  $R_L$  должно быть значительно меньше ее индуктивного сопротивления  $X_L$ . Тогда из закона Ома

$$I = \frac{U_L}{\omega \cdot L}, \quad \text{откуда} \quad L = \frac{U_L}{\omega \cdot I}$$

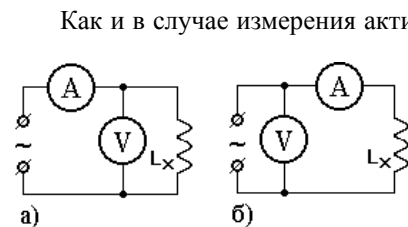


Рис. 3.20

то есть больших индуктивностях).

Для уменьшения погрешности измерения необходимо также учитывать активное сопротивление катушки, так как ее *полное сопротивление*

$$Z = \frac{U_L}{I} = \sqrt{R_L^2 + \omega^2 \cdot L^2}, \quad \text{откуда} \quad L = \frac{\sqrt{Z^2 - R_L^2}}{\omega}$$

С увеличением частоты подаваемого напряжения точность измерений уменьшается из-за влияния собственной емкости катушки и входной емкости вольтметра, которые суммируются. Емкость и измеряемая индуктивность образуют параллельный контур, сопротивление которого при резонансе возрастает, что эквивалентно увеличению индуктивности. Поэтому значение индуктивности, полученное в результате измерения, будет больше действительного значения, причем погрешность увеличивается при увеличении частоты напряжения питания.

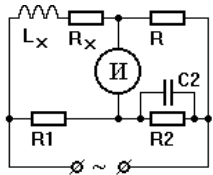


Рис. 3.21

Достаточно часто применяется **мостовой метод** измерения индуктивности. В качестве плеча сравнения может использоваться образцовая катушка индуктивности или образцовый конденсатор -  $C_2$  (рис. 3.21). Конденсатор применяется чаще в связи с трудностями изготовления катушек с малыми потерями. Условие равновесия моста

$Z_x Z_2 = Z Z_1$ , где  $Z_i = R_i + j X_i$ , запишется в виде:

$$\frac{R_x + j\omega L_x}{1/R_2 + j\omega C_2} = RR_1 \quad R_x + j\omega L_x = RR_1(1/R_2 + j\omega C_2)$$

Разделив вещественную и мнимую части, получим выражения для индуктивности катушки и ее активного сопротивления:  $L_x = C_2 RR_1$ ,  $R_x = RR_1/R_2$ .

Добротность катушки определяется выражением  $Q_x = \omega L_x/R_x = \omega R_2 C_2$ .

Уравновешивание моста достигается плавной регулировкой параметров  $R_2$  и  $C_2$ . Изменяя произведение  $RR_1$ , можно расширить пределы измерения моста.

### 3.6. Трансформаторы

*Трансформатор* – это устройство, служащее для повышения или понижения переменного напряжения без изменения его частоты и практически без потерь мощности. Трансформатор состоит из двух или более катушек, надетых на общий сердечник. Катушка, которая подключается к источнику переменного

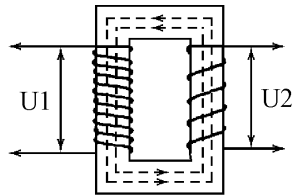


Рис. 3.22

напряжения, называется первичной, а катушка, к которой присоединяется нагрузка (потребители электрической энергии), - вторичной (рис. 3.22). Сердечники трансформаторов изготавливаются из электротехнической стали и набираются из отдельных изолированных друг от друга пластин (для уменьшения потерь энергии вследствие возникновения в сердечнике вихревых токов) – рисунок 3.23.

Катушки трансформатора, как правило, содержат разное количество витков, причем большее напряжение оказывается приложено к катушке с большим числом витков. Если трансформатор используется для повышения напряжения,

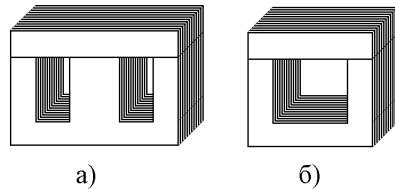


Рис. 3.23

то обмотка с меньшим числом витков подключается к источнику напряжения, а к обмотке с большим числом витков присоединяется нагрузка. Для понижения напряжения все делается наоборот. При этом не следует забывать, что подавать на первичную обмотку можно напряжение не больше номинального (того, на которое она рассчитана).

*Коэффициентом трансформации* называют отношение числа витков в первичной обмотке к числу витков во вторичной обмотке. Он равен также отношению ЭДС в обмотках.

$$k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{a_1}{a_2}$$

При отсутствии потерь в обмотках коэффициент трансформации равен отношению напряжений на зажимах обмоток:  $k = U_1/U_2$ .

Для понижающего трансформатора коэффициент трансформации больше 1, а для повышающего - меньше 1.

Принцип работы трансформатора основан на явлении электромагнитной индукции. При протекании переменного тока через первичную катушку вокруг нее возникает переменное магнитное поле и магнитный поток, который пронизывает также и вторую катушку. В результате во вторичной катушке появляется вихревое электрическое поле и на ее зажимах возникает ЭДС индукции.

Трансформатор характеризуется коэффициентом полезного действия, равным отношению мощности, выделяющейся во вторичной катушке, к мощности, потребляемой первичной катушкой от сети. У хороших трансформаторов КПД составляет 99 - 99,5%.

Важным свойством трансформатора является его способность преобразовывать сопротивление нагрузки. Рассмотрим трансформатор с КПД приблизительно равным 100%. В этом случае мощность, выделяющаяся во вторичной цепи трансформатора, будет равна мощности, потребляемой первичной обмоткой от источника напряжения. Для такого трансформатора мощность, потребляемая от источника напряжения, будет чисто активной. Мощность в первичной цепи трансформатора  $P_1 = (U_1^2)/R_1$ , а во вторичной цепи  $P_2 = (U_2^2)/R_2$ .

Так как  $P_1 = P_2$  и  $U_1 = kU_2$ , то  $R_1 = k^2 R_2$ .

Таким образом, нагрузка сопротивлением  $R_2$ , подключаемая к источнику переменного напряжения через трансформатор, по мощности будет эквивалентна нагрузке сопротивлением  $R_1$ , подключаемой без трансформатора.

Для регулировки переменного напряжения широко применяются лабораторные **автотрансформаторы**. Автотрансформаторы рассчитаны на подключение к сети переменного напряжения 220 В или 127 В. Как правило, выходное напряжение автотрансформатора регулируется плавно до 250 В. Принципиальная схема автотрансформатора приведена на рисунке 3.24а, а его устройство

показано на рисунке 3.24 б. Обмотка трансформатора выполнена изолированным проводом в один слой. На участках обмотки, которых касается подвижный контакт с угольной вставкой, изоляция очищена. При перемещении контакта угольная вставка закорачивает виток провода. Однако вследствие небольшого напряжения на одном витке и заметного сопротивления угольной вставки через замкнутый виток протекает допустимый ток.

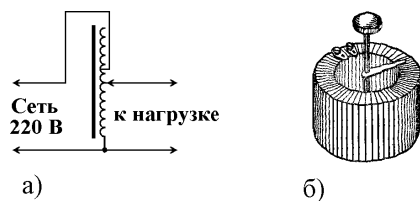


Рис. 3.24

Первичная обмотка автотрансформатора является частью его вторичной обмотки и поэтому между первичной и вторичной обмоткой трансформатора имеется гальваническая связь. К вторичной обмотке автотрансформатора нельзя непосредственно подключать потребители, один из проводов которых может оказаться соединенным с землей. Такое подключение приведет к аварии или несчастному случаю. **При работе с автотрансформатором запрещается заземлять вторичную цепь.**

Рассмотрим кратко **простейший расчет маломощных трансформаторов** бытовой радиоаппаратуры. Мощность трансформатора (в Вт) численно равна квадрату площади (в  $\text{см}^2$ ) поперечного сечения среднего стержня магнитопровода. Зная номинальную мощность трансформатора, можно найти ток в первичной обмотке при номинальной нагрузке во вторичных обмотках. Диаметр провода обмотки выбирается из расчета  $(2,5-3)\text{А}/\text{мм}^2$  поперечного сечения провода. Для стандартных магнитопроводов, применяемых для изготовления трансформаторов, число витков на 1 вольт примерно равно частному от деления 50 на площадь поперечного сечения центрального стержня магнитопровода, выраженную в  $\text{см}^2$ . Однако в зависимости от качества магнитопровода коэффициент может изменяться от 35 до 65.

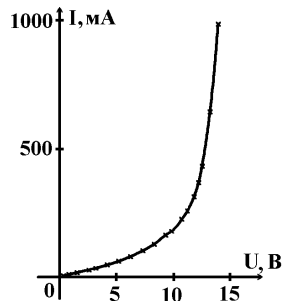


Рис. 3.25

Полное сопротивление катушки индуктивности с ферромагнитным сердечником зависит от силы протекающего через нее тока. Сопротивление катушки в зависимости от силы протекающего тока сначала увеличивается, достигает максимального значения, а затем уменьшается. На рисунке 3.25 приведена зависимость тока, протекающего в обмотке ненагруженного трансформатора, от приложенного к ней напряжения (исследован трансформатор источника ВУ-4/36 в режиме повышения напряжения).

Зависимость, приведенную на рисунке 3.25, называют характеристикой холостого хода трансформатора. Нелинейное возрастание тока холостого хода в зависимости от приложенного к первичной обмотке напряжения начинается примерно с  $0,8U_{\text{ном}}$ . Номинальное напряжение первичной обмотки трансформатора выбирают так, чтобы ток холостого хода составлял 5-10% от номинального тока. При напряжении  $1,1U_{\text{ном}}$  ток холостого хода не должен превышать 20-25% номинального тока нагруженного трансформатора.

### 3.7. Полупроводниковые диоды

#### 1. Электронно-дырочный переход

Основным элементом большинства полупроводниковых приборов является *электронно-дырочный переход (p-n переход)* – область на границе двух полупроводников с электронным и дырочным проводимостью.

При отсутствии внешнего электрического поля за счет теплового движения носители заряда будут диффундировать из области с большей концентрацией в область с меньшей концентрацией: электроны из n области переходят в p область, дырки – в обратном направлении (см. рисунок 3.26а, где темными кружками изображены электроны, светлыми – дырки). В результате ухода электронов в n области остаются положительные ионы донорной примеси, а в результате ухода дырок в p области остаются отрицательные ионы акцепторной примеси. Кроме этого, электроны, пришедшие в p область, рекомбинируют с дырками, образуя отрицательные ионы. Аналогично, дырки в n области рекомбинируют с электронами, образуя положительные ионы.

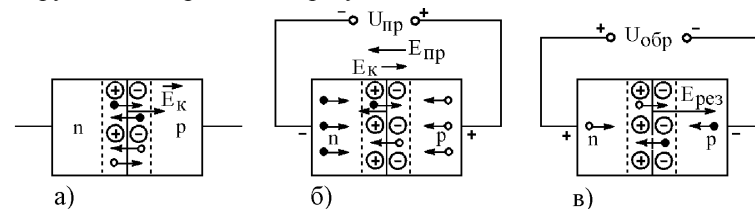


Рис. 3.26

В результате на границе между областями образуется двойной слой разноименно заряженных ионов (на рисунке ионы показаны кружками с плюсом и минусом). Этот слой называется *запирающим*. Он обеднен основными носителями заряда и обладает большим сопротивлением по сравнению с сопротивлением n и p областей.

Между образовавшимися объемными зарядами существует электрическое поле с разностью потенциалов 0,3-0,7 В (*контактная разность потенциалов*). Напряженность этого поля  $E_k$  направлена из n области в p область (рис. 3.26а).

Она препятствует дальнейшей диффузии основных носителей заряда и способствует переходу неосновных носителей в соседнюю область. Для основных носителей в этом случае возникает *потенциальный барьер*, высота которого равна контактной разности потенциалов.

Электрический ток, созданный диффузией основных носителей через переход, называется *диффузионным*. Электрический ток, созданный движением неосновных носителей под действием электрического поля, называется *дрейфовым*. Эти токи направлены в разные стороны и в отсутствие внешнего электрического поля компенсируют друг друга. Поэтому полный ток через переход равен нулю.

## 2. Вольт-амперная характеристика полупроводникового диода

Полупроводниковый диод представляет собой кристалл с электронно-дырочным переходом, к противоположным областям которого присоединены контакты для включения в цепь. Рассмотрим процессы протекания тока через диод при различной полярности внешнего напряжения.

Сначала подключим положительный полюс источника напряжения к области р-типа, а отрицательный – к области n-типа (*прямое подключение*) и будем постепенно увеличивать подаваемое напряжение (рис. 3.26 б). Напряженность внешнего электрического поля  $E_{пр}$  направлена противоположно напряженности электрического поля

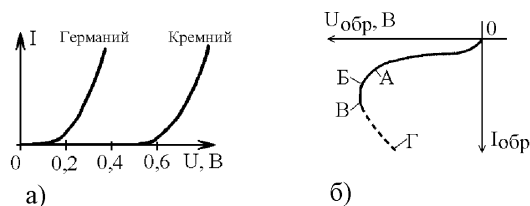


Рис. 3.27

запирающий слой (и, соответственно, потенциальный барьер) практически исчезает. Поэтому на начальном участке прямая ветвь *вольт-амперной характеристики* (зависимость силы тока в элементе от приложенного к нему напряжения) полупроводникового диода имеет значительную нелинейность, а затем становится почти линейной (рис. 3.27а). Небольшая нелинейность здесь объясняется тем, что при увеличении силы тока n и p области нагреваются и их сопротивление уменьшается (за счет генерации основных носителей заряда). У германиевых диодов рост тока начинается уже при напряжении около 0,1 В, а у кремниевых – около 0,5 В (рис. 3.27а).

При повышении температуры происходит разрыв ковалентных связей в полупроводниках, что приводит к увеличению концентрации носителей и, соответственно, уменьшению сопротивления. Поэтому при повышении температуры прямая ветвь вольт-амперной характеристики приближается к оси силы тока (рис. 3.28).

Если к диоду приложить напряжение обратной полярности (*обратное подключение*), то направление напряженности внешнего поля совпадет с направлением напряженности запирающего электрического слоя (рис. 3.26 в). Результирующее поле усиливается (потенциальный барьер повышается). Толщина запирающего слоя, а, следовательно, и сопротивление

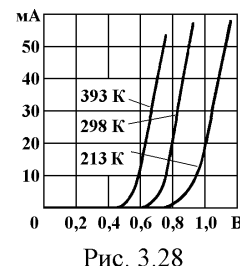


Рис. 3.28

перехода значительно увеличивается. Это приводит к почти полному прекращению тока основных носителей и почти не увеличивает ток неосновных носителей, поскольку их число ограничено. В результате при увеличении обратного напряжения обратный ток через переход сначала резко увеличивается (за счет уменьшения тока основных носителей, направленного навстречу току неосновных), а затем практически не изменяется (рис. 3.27б). Рост обратного тока происходит за счет нагрева перехода током, а также за счет увеличения числа носителей заряда в результате ударной ионизации (при высоком обратном напряжении электроны приобретают большую скорость и энергию, достаточную для выбивания из атомов кристаллической решетки новых электронов).

Обратный ток сильно зависит от температуры и у германиевых диодов он значительно больше, чем у кремниевых. Поэтому германиевые диоды можно использовать как датчики температуры при их обратном включении.

При некотором значении обратного напряжения возникает *электрический пробой* p-n перехода (при нем еще не происходит разрушения структуры вещества). Сопротивление запирающего слоя значительно уменьшается и обратный ток резко возрастает (участок А-Б-В на рисунке 3.27б). Могут существовать два вида электрического пробоя – лавинный и туннельный. Лавинный пробой происходит за счет лавинного увеличения числа носителей в результате ударной ионизации. Он характерен для p-n переходов большой толщины, получающихся при малой концентрации примесей в полупроводниках. В тонких переходах возможен туннельный пробой за счет туннельного эффекта. Работа диода в режиме электрического пробоя используется в специальных типах диодов – полупроводниковых стабилитронах.

При дальнейшем увеличении напряжения возникает *тепловой пробой*

перехода (участок В-Г). При протекании большого обратного тока в переходе выделяется количество теплоты больше того, которое отводится от перехода. Поэтому температура перехода увеличивается, сопротивление уменьшается и ток еще больше возрастает. Переход перегревается и вещество разрушается.

Анализ прямого и обратного подключения диода к источнику напряжения позволяет сделать вывод, что полупроводниковый диод хорошо проводит ток в прямом направлении и очень плохо в обратном. Это свойство диода позволяет применять его для выпрямления переменного тока.

### 3. Проверка исправности и определение выводов диодов

Проверка исправности полупроводниковых диодов может осуществляться с помощью омметра. Для этого измеряют сопротивление диода, подключая его к омметру сначала в одном направлении, затем в обратном. Как указывалось выше, при подключении диода в прямом направлении его сопротивление малое, в обратном направлении – очень большое. У неисправного диода сопротивление в обоих случаях равно нулю или бесконечности.

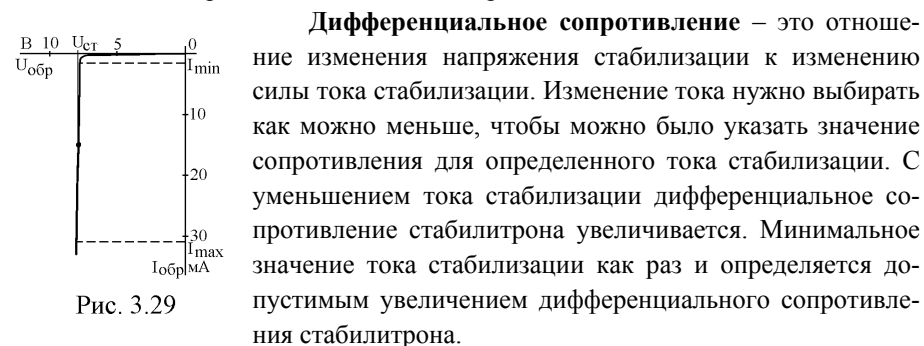
По аналогии с выводами вакуумного диода выводы полупроводникового диода также называют катодом и анодом. Катод – это вывод от области n типа, а анод – вывод от области p типа. На корпусе больших диодов изображают условное обозначение диода, на корпусе малых диодов делают специальную отметку, позволяющую найти вывод анода. Полярность диода можно определить экспериментально с помощью омметра. Для этого нужно знать, какой вывод внутреннего источника питания омметра подключен к гнезду "общ". Это можно определить с помощью диода с маркированной полярностью или вольтметра.

Для определения выводов диода необходимо подключить его к омметру в прямом направлении (чтобы сопротивление было малым) и посмотреть, какой вывод диода подключен к проводу омметра, соединенному с положительным полюсом внутреннего источника питания. Этот вывод диода и будет анодом.

### 3.8. Стабилитроны

Стабилитрон – это специальный полупроводниковый диод, при работе которого используется обратная ветвь вольт-амперной характеристики в режиме электрического пробоя. При значительных изменениях силы обратного тока через диод напряжение на нем практически не изменяется (стабильно). Если параллельно стабилитрону подключить нагрузку, то напряжение на ней тоже не будет изменяться. Стабилитроны изготавливаются из кремния и называются иногда опорными диодами. У них до наступления пробоя обратный ток очень мал, а в режиме пробоя сравним с прямым током. На рисунке 3.29 показан вид обратной ветви вольт-амперной характеристики стабилитрона.

Стабилитрон характеризуется следующими основными параметрами: минимальный и максимальный ток стабилизации, напряжение стабилизации при заданном токе стабилизации (см. рис. 3.29), дифференциальное сопротивление, температурный коэффициент напряжения стабилизации, максимальная допустимая мощность, рассеиваемая в стабилитроне.



**Дифференциальное сопротивление** – это отношение изменения напряжения стабилизации к изменению силы тока стабилизации. Изменение тока нужно выбирать как можно меньше, чтобы можно было указать значение сопротивления для определенного тока стабилизации. С уменьшением тока стабилизации дифференциальное сопротивление стабилитрона увеличивается. Минимальное значение тока стабилизации как раз и определяется допустимым увеличением дифференциального сопротивления стабилитрона.

Дифференциальное сопротивление стабилитронов составляет единицы и десятки ом. Для идеального стабилитрона дифференциальное сопротивление равно нулю и рабочую (обратную) ветвь вольт-амперной характеристики можно аппроксимировать двумя отрезками прямых. При напряжении, меньшем напряжения стабилизации, ток через стабилитрон равен нулю. При напряжении, равном напряжению стабилизации, изменение тока через стабилитрон не приводит к изменению напряжения на нем.

Дифференциальное сопротивление стабилитрона (сопротивление переменному току) не следует путать с его статическим сопротивлением (сопротивлением постоянному току), которое во много раз больше дифференциального.

**Максимальный ток стабилизации** стабилитрона определяется допустимой мощностью рассеяния.

**Температурный коэффициент напряжения стабилизации** (ТКН) показывает относительное изменение напряжения стабилизации при изменении температуры на 1 К:

$$\text{ТКН} = \frac{\Delta U_{\text{ст}}}{U_{\text{ст}} \Delta T}$$

Часто ТКН выражают в процентах.

ТКН стабилизации может быть отрицательным (у полупроводников с большой концентрацией примесей, малой толщиной перехода, где пробой происходит за счет туннельного эффекта) и положительным (в полупроводниках с меньшей концентрацией примесей, большей толщиной р-п перехода, где пробой возникает при более высоких напряжениях и является лавинным). У некоторых стабилитронов ТКН стабилизации изменяет знак при изменении величины тока через стабилитрон.

Значение тока через стабилитрон, при котором изменяется знак ТКН стабилизации, определяет так называемую **термостабильную точку стабилитрона**. Знание такой точки важно при проектировании высокостабильных стабилизаторов постоянного напряжения.

### 3.9. Биполярные транзисторы

#### 1. Общие сведения. Характеристики

**Биполярный транзистор** – это полупроводниковый прибор с двумя р-п переходами и тремя выводами, служащий для усиления мощности. В транзисторе имеется три области – эмиттер (э), база (б) и коллектор (к). В зависимости от типа проводимости этих областей различают транзисторы n-p-n и p-n-p типа. Таким образом, в транзисторе имеется два р-п перехода: эмиттер-база (эмиттерный) и коллектор-база (коллекторный). Стрелка на условных обозначениях транзисторов (см. в начале главы) указывает направление от р области к n области. Принцип работы обоих типов транзисторов одинаков.

Толщина базы делается значительно меньше длины свободного пробега неосновных носителей тока, попадающих в нее из эмиттера, а концентрация основных носителей в базе много меньше концентрации основных носителей в эмиттере. В результате в базе сводится до минимума рекомбинация неосновных носителей с основными, пришедшими из эмиттера. Площадь коллекторного перехода (перехода база-коллектор) значительно больше площади эмиттерного перехода (перехода база-эмиттер). Это делается для того, чтобы перехватить весь поток носителей, идущих от эмиттера, а также потому, что на коллекторном переходе выделяется большая мощность. Концентрация же основных носителей в коллекторе несколько меньше, чем в эмиттере.

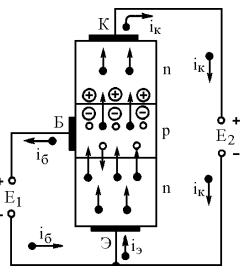


Рис. 3.30

В зависимости от того, какое напряжение (прямое или обратное) подано на переходы транзистора, выделяют четыре режима работы транзистора. В *активном* режиме (он является основным) напряжение на эмиттерном переходе прямое, на коллекторном – обратное. В режиме *отсечки* (запирания) на оба перехода подается обратное напряжение. В режиме *насыщения* напряжение на обоих переходах прямое. В *инверсном* режиме на коллекторном переходе напряжение прямое, а на эмиттерном – обратное.

Рассмотрим работу транзистора n-p-n типа в *активном* режиме без нагрузки (рис. 3.30). На рисунке темными кружками изображены электроны, светлыми – дырки. Поскольку на переход база-эмиттер подано прямое напряжение, то

сопротивление эмиттерного перехода мало и для получения тока на этом переходе достаточно напряжения  $E_1$  в десятые доли вольта. Сопротивление коллекторного перехода велико (на него подано обратное напряжение) и напряжение  $E_2$  обычно составляет единицы и десятки вольт.

При увеличении прямого напряжения на эмиттерном переходе электроны из эмиттера переходят в базу. Благодаря малой толщине базы и малой концен-

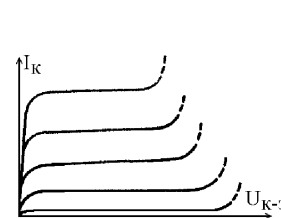


Рис. 3.31

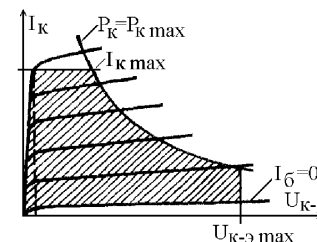


Рис. 3.32

трации в ней дырок лишь незначительная часть электронов рекомбинирует с дырками базы, образуя ток базы (его стараются сделать как можно меньше). Основная часть электронов достигает коллекторного перехода и под действием его обратного напряжения втягивается в коллектор (электроны являются неосновными носителями для базы и поле запирающего слоя на переходе коллектор-база является для них ускоряющим). Поэтому ток коллектора лишь немного меньше тока эмиттера:  $i_э = i_к + i_б$ .

Когда на эмиттерный переход не подано прямое напряжение, то через коллекторный переход протекает только небольшой обратный ток, созданный неосновными носителями. Таким образом, прямое напряжение эмиттерного перехода существенно влияет на токи эмиттера и коллектора: чем больше это напряжение, тем больше токи эмиттера и коллектора. Такое свойство транзистора позволяет использовать его в качестве электронного ключа, а также для усиления электрического тока.

Для расчета схем с транзисторами необходимо знать их характеристики (зависимости между токами и напряжениями). Для схемы включения транзистора с общим эмиттером (рис. 3.30) **входная характеристика** представляет собой зависимость силы тока базы от напряжения база-эмиттер при постоянном напряжении коллектр-эмиттер. Она имеет такой же вид, как прямая ветвь ВАХ полупроводникового диода. **Выходные характеристики** биполярного транзистора при схеме включения с общим эмиттером представляют собой зависимости силы тока коллектора от напряжения коллектор-эмиттер при различных постоянных значениях тока базы (рис. 3.31).

Самая нижняя выходная характеристика построена для  $i_6=0$ . Она похожа на обратную ветвь вольт-амперной характеристики полупроводникового диода.

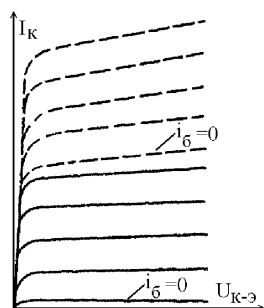


Рис. 3.33

Чем больше сила тока базы, тем выше расположена выходная характеристика.

Активная область на семействе выходных характеристик транзистора (рис. 3.32) ограничена максимально допустимым током коллектора, максимально допустимым напряжением коллектор-эмиттер, гиперболой максимально допустимой мощности рассеяния и неуправляемым током коллектора (ток коллектора при  $i_6=0$ ). Для уменьшения нелинейных искажений рабочую область ограничивают также слева (см. штриховую линию на рис. 3.32).

Характеристики транзисторов, как и всех полупроводниковых элементов, очень сильно зависят от температуры. При увеличении температуры сопротивление полупроводников уменьшается и токи в них увеличиваются. Поэтому семейство выходных характеристик при увеличении температуры смещается вверх (рис. 3.33).

## 2. Определение структуры и выводов биполярных транзисторов

В последнее время все чаще используют транзисторы, извлеченные из неработающих электронных приборов. В связи с этим возникает проблема определения структуры и выводов транзисторов.

При экспериментальном определении структуры транзистора (р-п-р или п-р-п) его можно рассматривать состоящим из двух диодов, соединенных в зависимости от структуры анодами или катодами (рис. 3.34 а, б), причем точка соединения диодов соответствует выводу базы транзистора. Для определения структуры и вывода базы транзистора воспользуемся омметром с известной полярностью напряжения, подаваемого на гнезда омметра от внутреннего источника питания. Обычно положительный полюс внутреннего источника питания омметра соединен с гнездом “общий”.

Следует отметить, что существуют омметры и с другой полярностью напряжения на гнездах. Так, например, авометр Ц20-05 выпускается в двух модификациях: в одной из них на общее гнездо омметра выведен плюс внутреннего источника питания, а в другой - минус. Поэтому перед экспериментальным определением структуры и вывода базы транзистора следует с помощью диода с маркированной полярностью проверить, какой полюс внутреннего источника питания омметра соединен с общим гнездом.

При одной полярности щупов омметра, подключаемых к переходу транзистора, сопротивление перехода оказывается малым (прямое подключение), а при другой - большим (обратное подключение). Если при малом сопротивлении переходов транзистора плюсовой щуп омметра касался одного и того же вывода, значит это вывод базы и транзистор имеет структуру п-р-п. Если в этой же ситуации минусовой щуп омметра касался одного и того же вывода (базы), то транзистор р-п-п типа.

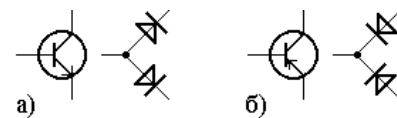


Рис. 3.34

После того, как определена структура транзистора и найден вывод базы транзистора, приступают к определению выводов эмиттера и коллектора. На рисунках, поясняющих принцип работы биполярного транзистора, области эмиттера и коллектора выглядят симметрично и, казалось бы, что выводы коллектора и эмиттера можно поменять местами. Однако конструктивно эмиттер и

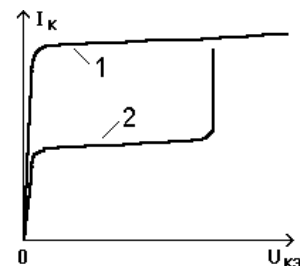


Рис. 3.35

коллектор выполняются по-разному (имеют неодинаковую концентрацию носителей заряда и площадь поверхности). Поэтому менять их местами не следует, так как получится существенно меньший коэффициент усиления по току и меньшая мощность рассеяния транзистора. Для некоторых транзисторов в этом случае может возникнуть лавинный пробой перехода база-эмиттер, что нарушит нормальную работу собранного электронного устройства. На рисунке 3.35 приведены две выходные характеристики транзистора КТ315А в схеме включения с общим эмиттером: 1 – для стандартного включения транзистора, 2 - для случая, когда эмиттер и коллектор транзистора поменяли местами (инверсный режим работы).

Существует несколько вариантов экспериментального определения выводов эмиттера и коллектора. Рассмотрим два из них.

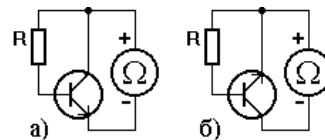


Рис. 3.36

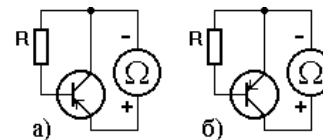


Рис. 3.37

Возьмем резистор сопротивлением 10-100 кОм и включим его между выводом базы и предполагаемым выводом коллектора. К выводам эмиттера и коллектора омметр можно подключить так, как показано на рисунках 3.36а и

**3.366** для транзистора n-p-n типа, а на рисунках **3.37а** и **3.37б** - для транзистора p-n-p типа. На всех рисунках предполагаемый вывод коллектора расположен вверх (по рисунку). Правильному выбору выводов коллектора и эмиттера соответствует меньшее сопротивление, фиксируемое омметром, т.е. подключение по схемам рисунков **3.36а**, **3.37а**.

Рассмотрим второй вариант определения выводов коллектора и эмиттера. В качестве источника питания используют любой источник постоянного напряжения (3-9 В). Миллиамперметр включают между положительным полюсом источника и предполагаемым выводом коллектора для транзисторов n-p-n типа (рис. **3.38а** и **3.38б**), между отрицательным полюсом источника и предполагаемым выводом коллектора для транзисторов p-n-p типа (рис. **3.39а** и **3.39б**). Предполагаемый вывод коллектора, как и в предыдущем случае, расположен на рисунке вверх. Правильно выбранному выводу коллектора соответствует больший ток, фиксируемый миллиамперметром.

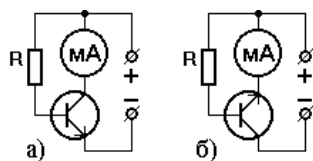


Рис. 3.38

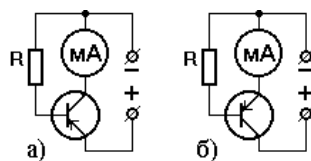


Рис. 3.39

В этом варианте можно определить не только выводы транзистора, но и приблизительно определить коэффициент усиления транзистора по току:

$$\beta = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_b} \approx \frac{I_k}{I_b},$$

где  $I_k$  - сила тока коллектора,  $I_b$  - сила тока базы.

Ток базы можно рассчитать по формуле 
$$I_b = \frac{U_n - U_{бэ}}{R},$$

где  $U_n$  - напряжение источника питания,  $U_{бэ}$  - напряжение между базой и эмиттером транзистора.

Для кремниевых транзисторов напряжение база-эмиттер составляет примерно 0,6 В. Выберем напряжение питания 4,5 В и сопротивление резистора 390 кОм. Тогда  $I_b = 10^{-2}$  мА, и коэффициент усиления определяется из формулы:

$$\beta \approx \frac{100 I_k}{I_b} \text{ где } I_k \text{ - сила тока коллектора в мА.}$$

### 3.10. Полевые транзисторы

Полевые транзисторы, называемые также униполярными или канальными, в отличие от биполярных имеют большое входное сопротивление. Полевые транзисторы подразделяются на полевые транзисторы с управляющим p-n переходом и с изолированным затвором. Полевые транзисторы с изолированным затвором в свою очередь подразделяются на транзисторы со встроенным каналом и транзисторы с индуцированным каналом. Канал в полевых транзисторах может быть n или p типа. Канал - это область полевого транзистора, через которую протекают основные носители заряда. Величина тока в канале управляется электрическим полем. Транзисторы, как правило, имеют три вывода. Вывод, от которого в канал приходят основные носители заряда, называется истоком. Вывод, к которому носители заряда приходят из канала, называется стоком. Вывод, на который подается управляющее напряжение относительно истока или стока, называется затвором. Название транзисторы получили вследствие особенностей работы. Полевыми транзисторы называют потому, что управление током в выходной цепи транзистора осуществляется электрическим полем во входной цепи. Канальными транзисторы называют потому, что ток в выходной цепи транзистора протекает через его канал. Униполярными транзисторы называют потому, что в работе транзистора принимают носители одной полярности. Условные обозначения полевых транзисторов приведены в начале этой главы. В условных обозначениях полевых транзисторов на принципиальных схемах стрелка направлена к каналу n-типа, или от канала p-типа. Индуцированный (наведенный электрическим полем) канал, обозначается пунктиром.

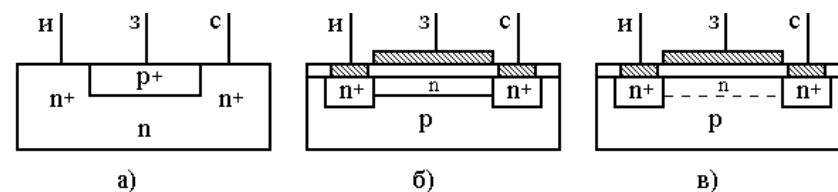


Рис. 3.40

Рассмотрим принцип работы полевого транзистора с управляющим p-n переходом с каналом n-типа (рис. **3.40а**). Знаком плюс показана повышенная концентрация носителей заряда. Области истока и стока делаются с повышенной проводимостью для того, чтобы уменьшить бесполезное падение напряжения на них. Повышенной проводимостью обладает и область затвора с целью увеличения запирающего слоя в сторону канала при увеличении управляющего напряжения. В таких транзисторах управляющее напряжение прикладывается к p-n переходу затвор-исток в обратном направлении.

Если увеличивать напряжение между затвором и истоком в указанной полярности, то запирающий слой р-п перехода становится толще и площадь поперечного сечения канала уменьшается. Сопротивление канала постоянному току увеличивается и ток стока становится меньше. Зависимость тока стока от напряжения затвор-исток при постоянном напряжении сток-исток называется **стокозатворной характеристикой** полевого транзистора. **Стоковая характеристика** полевого транзистора для схемы включения транзистора с общим истоком – это зависимость тока стока от напряжения сток-исток при постоянном напряжении затвор-исток.

Проставим полярность подключения источников напряжения во входной и выходной цепях полевого транзистора с управляющим р-п переходом с каналом n типа для схемы включения транзистора с общим истоком (рис. 3.41). Мы знаем определения выводов транзистора и то, что р-п переход затвор-исток смещается в обратном направлении. Следовательно, основные носители заряда электроны должны двигаться в соответствии с определением выводов транзистора от истока к стоку, т.е. снизу вверх. Чтобы электроны двигались в таком направлении необходимо в выходной цепи транзистора плюс источника питания подключить к стоку, минус к истоку. Для смещения р-п перехода затвор-исток в обратном направлении необходимо к затвору подключить минус источника, а к истоку плюс. Стокозатворная характеристика полевого транзистора с

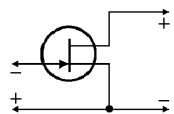


Рис. 3.41

управляющим р-п переходом с каналом n-типа для схемы включения транзистора с общим истоком приведена на рисунке 3.42а, а стоковые характеристики на рисунке 3.42б.

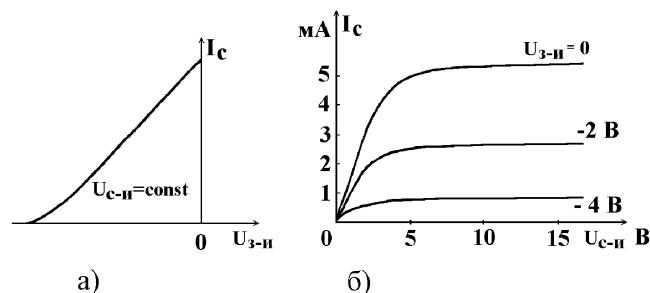


Рис. 3.42

устройство полевого транзистора с изолированным затвором со встроенным каналом n-типа. На затвор относительно истока такого транзистора можно подавать управляющее напряжение обеих полярностей. Семейство стоковых характеристик данного транзистора приведено на рисунке 3.43 б, а на рисунке 3.43 а – одна из его стокозатворных характеристик. При подаче на затвор относительно истока положительного напряжения в канал будут приходить электроны из областей сто-

ка, истока и кристалла р-типа и ток в цепи сток-исток будет увеличиваться. Такой режим работы называют режимом обогащения носителей заряда в канале. При подаче на затвор относительно истока отрицательного напряжения канал транзистора обедняется основными носителями заряда и ток стока уменьшается. Этот режим работы транзистора называется режимом обеднения.

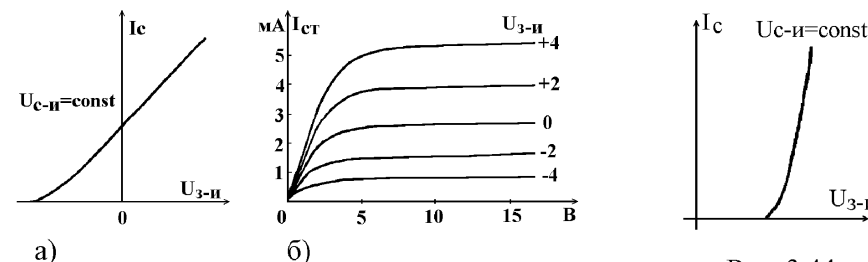


Рис. 3.43

Транзисторы характеризуют рядом параметров. **Начальный ток стока** – это ток стока при напряжении между затвором и истоком равно нулю и напряжении сток исток равно или превышающем напряжение насыщения. **Напряжением насыщения** называют напряжение сток-исток, начиная с которого ток стока практически не увеличивается при увеличении напряжения сток-исток при заданном напряжении затвор-исток. **Ток утечки затвора** – это ток затвора между затвором и остальными выводами транзистора, замкнутыми между собой. **Обратный ток перехода затвор-исток при разомкнутом выводе стока** – это ток в цепи затвор-исток при заданном обратном напряжении между затвором и истоком и разомкнутом выводе стока. **Напряжение отсечки полевого транзистора** – это напряжение затвор-исток для транзисторов с управляющим р-п переходом и транзисторов с изолированным затвором со встроенным каналом, при котором ток стока достигает заданного значения, обычно 10 мкА.

**Пороговое напряжение полевого транзистора** – это напряжение затвор-исток для транзисторов с изолированным затвором с индуцированным каналом (рис. 3.40в), при котором ток стока достигает заданного значения (рис. 3.44), обычно 10 мкА. При отсутствии напряжения между затвором и истоком ток в цепи сток-исток не протекает, т.к. один из р-п переходов оказывается включенным в обратном направлении. При определенном напряжении затвор-исток в области, прилегающей к затвору, наступает инверсия проводимости и в цепи сток-исток появляется ток.

К **предельным параметрам** полевых транзисторов относятся: максимальный ток стока; максимально допустимые напряжения между выводами сток-исток, затвор-исток, затвор-сток; максимально допустимая мощность рассеяния; максимальная и минимальная температура окружающей среды.

## Глава 4. ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

### 4.1. Общие характеристики источников электрической энергии

Рассмотрим характеристики источников электрической энергии. В литературе достаточно часто источники электрической энергии называют источниками тока. Однако следует различать источники тока и источники напряжения.

**Источником напряжения** называется источник постоянного или переменного напряжения, у которого внутреннее сопротивление равно нулю. Напряжение на зажимах такого источника не зависит от сопротивления нагрузки. Источник

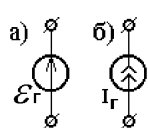


Рис. 4.1

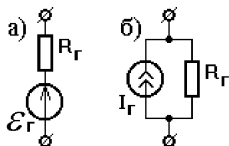


Рис. 4.2

напряжения называют также источником ЭДС. Условное обозначение источника напряжения приведено на рисунке 4.1а.

**Источником тока** называется источник постоянного или переменного тока, у которого внутреннее сопротивление равно бесконечности. Сила

тока через нагрузку, подключенную к такому источнику, не зависит от сопротивления нагрузки. Условное обозначение источника тока приведено на рисунке 4.1б.

Один и тот же реальный источник можно изобразить так, как показано на рисунках 4.2а и 4.2б. Эти две схемы эквивалентны. Схема, приведенная на рисунке 4.2а, позволяет рассчитать ток в нагрузке при известном сопротивлении нагрузки, внутреннем сопротивлении и ЭДС источника напряжения. Схема, приведенная на рисунке 4.2б, позволяет рассчитать напряжение на нагрузке при известном сопротивлении нагрузки, внутреннем сопротивлении и токе источника тока.

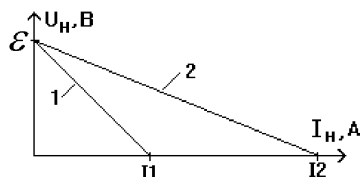


Рис. 4.3

На рисунке 4.3 приведены графики зависимостей напряжения на зажимах реального источника напряжения от силы тока нагрузки для двух различных значений внутреннего сопротивления источника.

Для получения меньших напряжений используют делители напряжения на резисторах (рис. 4.4). Пусть имеющийся источник напряжения характеризуется

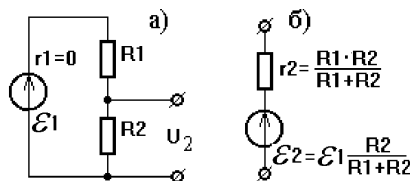


Рис. 4.4

электродвижущей силой  $\mathcal{E}_1$  и внутренним сопротивлением равным нулю. Выход делителя можно рассматривать как другой источник напряжения, имеющий ЭДС  $\mathcal{E}_2 = \mathcal{E}_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$  и внутреннее сопротивление  $r_2 = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$ . Выражения для ЭДС и внутреннего сопротивления другого источника напряжения получаются из законов Ома.

### 4.2. Химические источники тока

#### 1. Общие сведения. Характеристики

Для питания радиоэлектронных устройств на транзисторах необходимо постоянное напряжение. Если радиоэлектронное устройство потребляет маленькую мощность, то такое устройство достаточно часто питают от химического источника тока. Химические источники тока подразделяются на первичные и вторичные. К первичным источникам тока относятся различные гальванические элементы и батареи, составленные из них. Вторичные источники тока - это аккумуляторы.

Рассмотрим основные параметры *первичных источников тока*.

**Электродвижущая сила** характеризует работу сторонних сил при перемещении единичного положительного заряда от отрицательного полюса к положительному внутри источника. ЭДС измеряется на зажимах источника при бесконечно большом сопротивлении внешней цепи (непосредственным подключением вольтметра к зажимам источника).

Напряжение на зажимах элемента или батареи измеряется под нагрузкой. Различают начальное, среднее и конечное напряжение. Конечное напряжение - это напряжение, до которого может разряжаться источник тока при его эксплуатации.

**Внутреннее сопротивление источника тока** определяет падение напряжения внутри него (см. закон Ома для замкнутой цепи). Чем меньше внутреннее сопротивление источника тока, тем большим будет ток разрядки при заданном напряжении на зажимах источника.

**Разрядная емкость источника** - это электрический заряд, который можно получить от источника при определенных условиях его эксплуатации. Разрядная емкость зависит от силы тока разряда. Однако с некоторым приближением можно считать разрядную емкость постоянной, не зависящей в определенных пределах от тока нагрузки. Например, батарейка карманного фонаря имеет разрядную емкость 0,5 А·ч ( $1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ с}$ , тогда  $1 \text{ А} \cdot \text{ч} = 3600 \text{ Кл}$ ) и при токе разрядки 100 мА работает 5 часов, тогда при токе разрядки 250 мА батарейка проработает 2 часа.

**Номинальная разрядная емкость источника тока** - это электрический заряд, который должен отдать источник тока непосредственно при его изготовлении при номинальном режиме разряда (задается либо ток разрядки, либо сопротивление внешней цепи).

**Саморазряд источника тока** - это потеря разрядной емкости при разомкнутой внешней цепи (при повышении температуры окружающей среды саморазряд увеличивается).

**Сохранность источника тока** - это время, в течение которого элемент сохраняет определенную часть номинальной емкости.

**Удельная емкость источника тока по массе** - это отношение разрядной емкости источника тока к его массе.

**Удельная емкость источника тока по объему** - это отношение разрядной емкости источника тока к его объему.

Рассмотрим основные параметры *аккумуляторов*.

**Зарядная емкость аккумулятора** - это электрический заряд, проходящий через аккумулятор при его полной зарядке.

**Разрядная емкость аккумулятора** - это электрический заряд, отдаваемый аккумулятором при его полной разрядке.

**Коэффициент отдачи по емкости** - это отношение разрядной емкости к зарядной.

**Срок службы аккумулятора** - это время работы, по истечении которого разрядная емкость аккумулятора станет меньше определенной нормированной величины.

## 2. Зарядка малогабаритных аккумуляторов и восстановление гальванических элементов

Зарядка малогабаритных аккумуляторов и восстановление гальванических элементов и батарей обычно производится током, численно равным 0,1 емкости аккумулятора или гальванического элемента, выраженной в А·ч. Имеются различные *способы зарядки аккумуляторов*:

- зарядка фиксированным током в течение определенного времени (обычно током, численно равным 0,1 емкости, в течение 16 часов);
- зарядка уменьшающимся по величине током до определенного напряжения;
- зарядка несимметричным током;
- поочередная зарядка и разрядка в течение определенных промежутков времени (например, в течение 0,01с зарядка и 0,01с разрядка, но меньшим током, или зарядка и разрядка одним током, но в течение разного времени).

Рассмотрим по упрощенной схеме (рис. 4.5) принцип работы устройства

для зарядки аккумуляторов карманного фонарика. В положительный полупериод сетевого напряжения через конденсатор  $C_1$ , диод VD1 и аккумуляторы протекает ток зарядки. Конденсатор заряжается до напряжения чуть более 300В (амплитуда сетевого напряжения равна  $220 \text{ В} \cdot \sqrt{2} = 311 \text{ В}$ , напряжение на аккумуляторах на более 4,5 В, а напряжение на конденсаторе равно разности напряжения сети и напряжения на диоде VD1 и аккумуляторах). Если бы не было диода VD2, ток зарядки аккумулятора прекратился бы, поскольку конденсатор зарядился бы и не смог разрядиться в отрицательный полупериод сетевого напряжения.

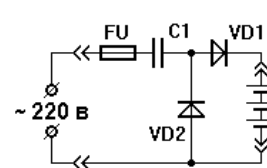


Рис. 4.5

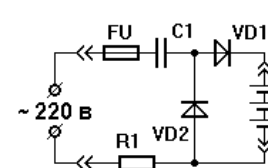


Рис. 4.6

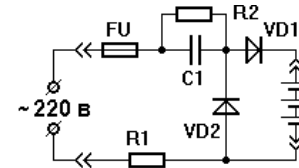


Рис. 4.7

В отрицательный полупериод конденсатор перезаряжается через диод VD2 (до напряжения 310 В). Тогда в следующий положительный полупериод он получает возможность заряжаться через диод VD1 и аккумуляторы.

Импульсы токов, протекающих через диоды при перезарядках конденсатора, оказываются большими. Для их ограничения в практическую схему (рис. 4.6) включают резистор  $R_1$  сопротивлением 100-200 Ом при емкости аккумулятора менее 0,55 А·ч (при большей емкости заряжаемого аккумулятора сопротивление резистора  $R_1$  необходимо уменьшить).

Собранное по данной схеме зарядное устройство имеет следующий недостаток. После отключения устройства от сети конденсатор может оказаться заряженным и разрядится через тело человека, коснувшегося вилки устройства. Чтобы обеспечить разрядку конденсатора  $C_1$  после отключения устройства от сети необходим резистор  $R_2$  (рис. 4.7).

Сопротивление резистора  $R_2$  выбирают в диапазоне 110-510 кОм (указанный диапазон может быть изменен) независимо от емкости заряжаемого аккумулятора. Возьмем карманный фонарик, в котором используются три последовательно соединенных аккумулятора Д-0,26Д (зарядное устройство вмонтировано в корпус фонарика). Зарядный ток для каждого из этих аккумуляторов выбирают 26 мА, т.е. зарядный ток берут численно равным 0,1 от емкости аккумулятора, выраженной в А·ч. Выберем полупроводниковые диоды VD1 и VD2 с учетом среднего значения выпрямленного тока и максимально допустимого обратного напряжения. Через диод VD1 должен протекать средний ток 26 мА. Ток, протекающий через VD2, будет примерно таким же (доказать самостоятельно).

Рассчитаем обратные напряжения, приложенные к диодам. При подключенном аккумуляторе к каждому из диодов приложено обратное напряжение не более 5 В. Если зарядное устройство включено в сеть при отключенных аккумуляторах, то к диоду VD1 напряжение ни в прямом, ни в обратном направлении не прикладывается, а к диоду VD2 прикладывается достаточно большое обратное напряжение, зависящее от соотношения сопротивления резистора  $R_1$  и сопротивления обратно смещенного р-п перехода диода. При большом обратном сопротивлении диода к диоду окажется приложенным практически двойное значение сетевого напряжения (сетевое напряжение плюс напряжение на конденсаторе), т.е. напряжение порядка 600 В.

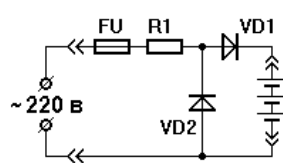


Рис. 4.8

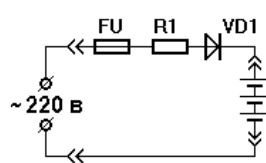
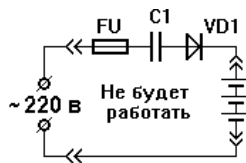


Рис. 4.9



Возьмем резисторы  $R_1=200$  Ом, а  $R_2=220$  кОм. При токе 26 мА к резистору  $R_1$  будет приложено напряжение 5,2 В (по закону Ома для участка цепи). Можно считать примерно, что к резистору  $R_2$  приложено напряжение 210-215В (амплитуды переменного напряжения на резисторе для положительного и отрицательного полупериодов сетевого напряжения немного отличаются). Рассчитаем мощности, которые рассеиваются на резисторах  $R_1$  и  $R_2$ :

$$P_{R2}=0,2 \text{ Вт}, P_{R1}=0,14 \text{ Вт}.$$

Следовательно, выбираем резисторы мощностью рассеяния 0,25 Вт или с запасом по мощности 0,5 Вт.

Определим емкость и рабочее напряжение конденсатора  $C_1$ . Через резистор  $R_2$  будет протекать ток 1 мА ( $220 \text{ В}:220 \text{ кОм}$ ), а зарядный ток аккумуляторов должен быть 26 мА. Следовательно, через конденсатор должен протекать ток 25 мА. Из закона Ома для участка цепи определим сопротивление конденсатора переменному току  $X_C$ , а затем из формулы  $X_C=1/(2\pi fC)$  определим емкость конденсатора  $C_1$ , зная частоту напряжения питающей сети.

Конденсатор может заряжаться до амплитудного напряжения и поэтому его рабочее напряжение необходимо выбрать не менее 300 В.

Ответим на вопрос, почему в зарядном устройстве карманного фонарика применен конденсатор, а не использована более простая схема только с одним резистором  $R_1$  (рис. 4.8). Для этого рассчитаем сопротивление резистора  $R_1$  и выделяющуюся на нем мощность:  $U_{R1}=215 \text{ В}$ ,  $I=26\text{мА}$ , тогда  $R_1=8,2 \text{ кОм}$ , а  $P\approx 5 \text{ Вт}$ .

Величина мощности рассеяния 5 Вт является достаточно большой для резистора и разместить резистор такой мощности в миниатюрном закрытом корпусе фонарика нельзя, так как будет перегрев зарядного устройства. Собранное по этой схеме зарядное устройство можно использовать, если взять напряжение питания не 220 В, а существенно меньшее, например, 12 В. В этом случае на резисторе  $R_1$  выделяется меньшая мощность, так как ток зарядки определяется емкостью аккумулятора, а сопротивление резистора  $R_1$  существенно меньше.

В случае однополупериодного выпрямителя (рис. 4.9 а) использовать вместо ограничительного резистора конденсатор (рис. 4.9 б) нельзя, т.к. устройство, собранное по схеме рисунка 4.9б, работать не будет.

На рисунке 4.10 приведена схема зарядного устройства, в котором за счет применения стабилитрона VD2 исключается перезарядка аккумулятора. При зарядке трех никелево-кадмиевых аккумуляторов, соединенных последовательно, в качестве стабилитрона VD2 можно выбрать КС147А. Стабилитроны даже одной партии имеют некоторый разброс по напряжению стабилизации. Поэтому необходимо подобрать такой стабилитрон, чтобы он открывался при напряжении на аккумуляторах 4,05 В.

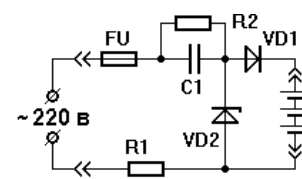


Рис. 4.10

Перед началом работы с малогабаритными аккумуляторами и гальваническими элементами необходимо проверить их пригодность к эксплуатации. С этой целью измеряют напряжение на зажимах аккумулятора или гальванического элемента при подключенной нагрузке. Для каждого аккумулятора и гальванического элемента в справочнике указывается

либо номинальный ток нагрузки, либо номинальное сопротивление нагрузки. Так, например, ЭДС полностью заряженного никелево-кадмиевого аккумулятора равна 1,35 В, номинальный ток разряда - численно равен 0,1 емкости аккумулятора, выраженной в А·ч, номинальное напряжение в начале разряда - 1,25В, а в конце - 1В. Разряд аккумулятора до напряжения менее 1 В приводит к резкому сокращению срока службы.

Многочисленные исследования последних лет показали, что заряжать можно не только аккумуляторы, но и гальванические элементы. Однако, гальванические элементы при зарядке не восстанавливают свою первоначальную емкость, а их подзарядка, как правило, может быть осуществлена только один раз. Заряжают гальванические элементы так же, как и малогабаритные аккумуляторы. Продлить срок службы некоторых гальванических элементов можно также введением в элемент с помощью шприца электролита, после этого производится зарядка элемента.

### 4.3. Выпрямители

Из курса физики Вам известно, что **выпрямитель** представляет собой прибор, преобразующий переменный по величине и направлению ток в ток одного направления. Выпрямители относятся к вторичным источникам электропитания.

Простейший выпрямитель переменного тока состоит из трансформатора и полупроводникового диода (рис. 4.11 а). Для простоты будем считать трансформатор и диод идеальными, то есть у трансформатора активное сопротивление обмоток равно нулю, прямое сопротивление диода также равно нулю, а обратное сопротивление диода равно бесконечности (обратным током можно пренебречь).

На вход выпрямителя со вторичной обмотки трансформатора подается синусоидальное напряжение (рис. 4.11 б). В первый полупериод, когда на верхней (по схеме) точке обмотки положительный потенциал относительно

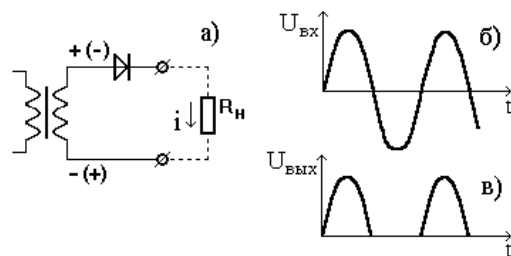


Рис. 4.11

нижней точки, диод открыт и через нагрузочный резистор протекает ток. Во второй полупериод (полярность напряжения указана в скобках) диод закрыт и ток в резисторе отсутствует. Таким образом, выходное напряжение (оно снимается с нагрузочного

резистора) имеет форму половинок синусоиды (рис. 4.11 в). Оно называется пульсирующим.

Рассмотренный выпрямитель называется **однополупериодным**, поскольку в нем используются только половины каждого из периодов сетевого напряжения. Схема однополупериодного выпрямителя в практике применяется очень редко, поскольку получается большой коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения (по сравнению с двухполупериодным выпрямителем при одинаковых сопротивлениях нагрузки).

В практике применяются **двухполупериодные** выпрямители. Они бывают мостовыми и с выводом от средней точки вторичной обмотки трансформатора.

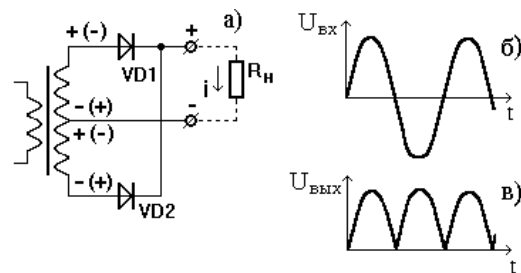


Рис. 4.12

В двухполупериодных выпрямителях используются оба полупериода напряжения сети, поэтому они являются более эффективными, чем однополупериодные.

Рассмотрим работу двухполупериодного выпрямителя с двумя диодами и выводом от средней точки вторичной обмотки трансформатора (рис. 4.12а). Его можно рассматривать как совокупность двух однополупериодных выпрямителей, к которым подсоединен один и тот же резистор нагрузки.

Пусть в первый полупериод на верхней (по схеме) точке обмотки трансформатора оказался положительный потенциал относительно нижней точки и, соответственно, относительно средней точки. Тогда ток будет протекать от верхней точки обмотки через диод VD1 к выводу "+", через резистор нагрузки к выводу "-" и средней точке обмотки. Во второй полупериод на нижней (по схеме) точке обмотки окажется положительный потенциал относительно средней и верхней точки. Ток в этом случае будет протекать от нижней точки обмотки через диод VD2 к выводу "+", через резистор нагрузки к выводу "-" и средней точке вторичной обмотки трансформатора. Таким образом, ток через резистор все время протекает в одном направлении и на выходе получается форма напряжения, изображенная на рисунке 4.12 в.

Недостатком рассмотренного выпрямителя является то, что в каждый из полупериодов напряжение снимается только с половины вторичной обмотки

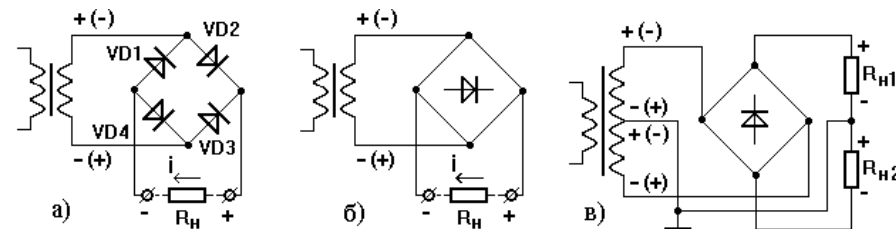


Рис. 4.13

трансформатора. Более экономичным является двухполупериодный выпрямитель, собранный на четырех диодах (рис. 4.13 а). Эта схема называется **мостовой**, поскольку в ней применен диодный мост. К одной из диагоналей моста присоединяют вторичную обмотку трансформатора, а к другой - нагрузочный резистор. Иногда на схемах диодный мост изображают с помощью одного диода (рис. 4.13 б).

В положительный полупериод сетевого напряжения (сверху по схеме на обмотке "+", снизу "-") ток протекает от верхней точки обмотки через диод VD2 к клемме "+", через резистор нагрузки к клемме "-", через диод VD4 к

нижней точке обмотки. В отрицательный полупериод сетевого напряжения (полярность показана в скобках) ток протекает от нижней точки обмотки через диод VD3 к клемме “+”, через резистор нагрузки к клемме “-”, через диод VD1 к верхней точке обмотки. Таким образом, каждая пара диодов работает поочередно и оба полупериода ток через резистор нагрузки имеет одно и то же направление.

Для питания операционных усилителей необходимо иметь два источника питания разной полярности, имеющих общую точку. На рисунке 4.13в показана схема выпрямителя, обеспечивающего двухполупериодное выпрямление каждого из напряжений на резисторах  $R_{H1}$ ,  $R_{H2}$

Выпрямленное напряжение, получаемое на выходе всех рассмотренных типов выпрямителей, является пульсирующим; в нем можно выделить постоянную и переменную составляющие. **Постоянная составляющая выпрямленного напряжения** - это среднее значение напряжения за период. **Коэффициент пульсаций** - это отношение амплитуды первой гармоники выпрямленного напряжения к постоянной составляющей выпрямленного напряжения. Для нормальной работы большинства электронных устройств необходимо, чтобы пульсации напряжения были как можно меньше. Поэтому на выходе выпрямителей достаточно часто устанавливают **сглаживающие фильтры**, уменьшающие пульсации выпрямленного напряжения.

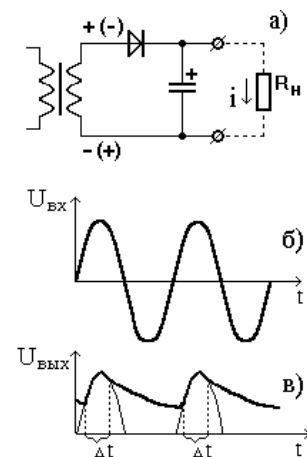


Рис. 4.14

трансформатора становится меньше напряжения, до которого зарядился конденсатор, он начинает разряжаться через нагрузочный резистор. Причем направление разрядного тока совпадает с направлением тока, протекающего в

резисторе через открытый диод. В следующий положительный полупериод конденсатор через открытый диод снова заряжается и процессы зарядки повторяются. Тем самым заполняются паузы в токе, протекающем через резистор, и пульсации выпрямленного напряжения сглаживаются (рис. 4.14 в).

В выпрямителях применяются емкостно - индуктивные, емкостно - резистивные и электронные фильтры. Простейшие варианты схем таких фильтров приведены на рисунках 4.15 а, б, в соответственно. Емкостно -

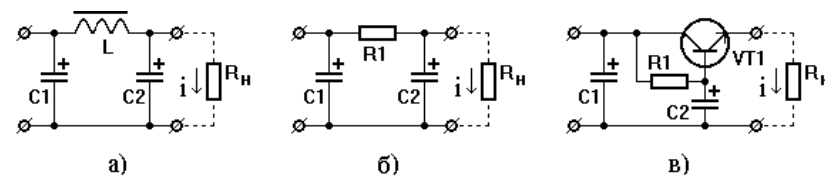


Рис. 4.15

резистивные фильтры в настоящее время применяются очень редко и при очень небольших токах нагрузки. Для фильтрации выпрямленного напряжения достаточно часто используются электронные фильтры. В качестве примера на рисунке 4.16 приведена схема электронного фильтра, примененного в экономичном импульсном стабилизаторе напряжения [42]. Ток базы транзистора VT2 протекает по цепи: плюс источника, резистор R2, переход баз-эмиттер транзистора, резистор нагрузки, минус источника. Ток

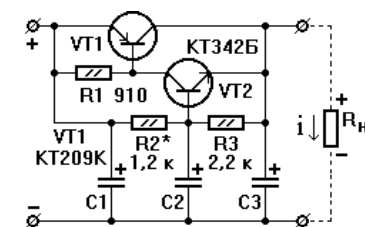


Рис. 4.16

базы транзистора VT1 протекает по цепи: плюс источника питания, переход эмиттер-база транзистора VT1, выводы коллектор-эмиттер транзистора VT2, резистор нагрузки, минус источника питания. Напряжение на конденсаторе  $C_2$  изменяется в основном за счет изменения силы тока базы транзистора VT2, а ток базы этого транзистора существенно меньше тока нагрузки (транзисторы должны иметь большой коэффициент усиления по току).

Для получения высоких напряжений обычно используют схемы умножения напряжения. На рисунке 4.17а приведена схема умножителя напряжения. Умножители напряжения позволяют получить большое значение выпрямленного напряжения при не очень больших обратных напряжениях, приложенных к диодам. Выпрямители по схеме умножения напряжения используют для питания электронно-лучевых трубок осциллографов и телевизоров.

Если в распоряжении пользователя нет полупроводниковых диодов с необходимым обратным напряжением, то диоды можно включать последовательно для повышения допустимого обратного напряжения. Чтобы диоды не вышли из строя из-за разброса их обратных сопротивлений параллельно каждому диоду подключают резисторы сопротивлением 30-100 кОм (рис. 4.17 б). Сопротивление резисторов должно быть одинаковым и меньше наименьшего из обратных сопротивлений диодов. Тогда к каждому из диодов будут приложены примерно одинаковые обратные напряжения.

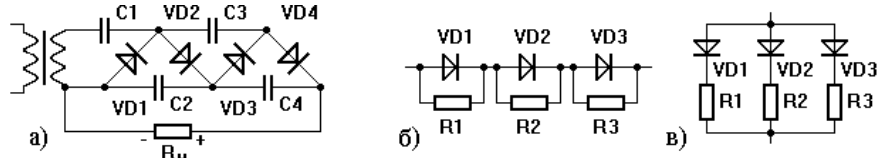


Рис. 4.17

Если нужно получить прямой ток, больший предельного тока одного диода, используют параллельное соединение диодов (рис. 4.17в). Чтобы диоды не вышли из строя из-за разброса прямых токов (даже у одностипных диодов разброс может составлять десятки процентов) последовательно с диодами включают уравнивающие резисторы сопротивлением десятые доли ома или единицы ом. Сопротивления резисторов подбирают экспериментально, чтобы токи через диоды были одинаковыми.

#### 4.4. Стабилизаторы постоянного напряжения и тока

Для питания низковольтных устройств широко используются полупроводниковые стабилизаторы постоянного напряжения. Стабилизаторы делятся на два основных класса: параллельного и последовательного типов. Наибольшее распространение получили стабилизаторы последовательного типа.

К основным параметрам стабилизаторов напряжения относятся: выходное сопротивление, коэффициент стабилизации, коэффициент полезного действия стабилизатора.

**Выходное сопротивление** стабилизатора напряжения равно отношению изменения выходного напряжения к соответствующему изменению тока нагрузки.

**Коэффициент стабилизации** равен отношению относительного изменения входного напряжения к относительному изменению выходного напряжения:

$$k_{ст} = \frac{\Delta U_{вх} / U_{вх}}{\Delta U_{ст} / U_{ст}}$$

**Коэффициент полезного действия** – это отношение номинальной мощности в нагрузке к номинальной входной мощности.

На рисунке 4.18 приведена схема параметрического стабилизатора постоянного напряжения. Рассмотрим случай идеального стабилитрона. Рабочая ветвь вольтамперной характеристики идеального стабилитрона может быть представлена в виде двух отрезков прямых. Дифференциальное сопротивление такого стабилитрона равно бесконечности при напряжениях меньших напряжения стабилизации и равно нулю при напряжении равном напряжению стабилизации. На рисунке 4.19а показана зависимость выходного напряжения параметрического стабилизатора напряжения с идеальным стабилитроном от напряжения, подаваемого на вход стабилизатора. На рисунке 4.19б показана зависимость выходного напряжения этого же стабилизатора от силы тока нагрузки.

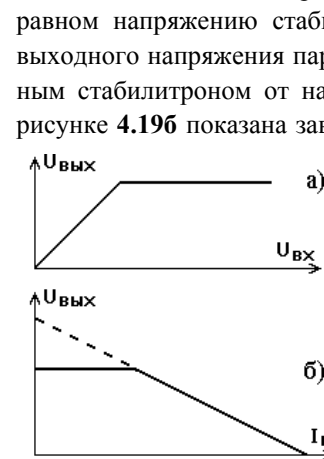


Рис. 4.19

На рисунке 4.20 приведена схема компенсационного стабилизатора постоянного напряжения. Рассмотрим принцип работы этого стабилизатора напряжения как системы автоматического регулирования. Учтем, что при входных напряжениях, которые больше напряжения стабилизации стабилитрона VD1, напряжение на стабилитроне не зависит от входного напряжения.

Нестабильность выходного напряжения может быть обусловлена как изменением сопротивления нагрузки, так и изменением входного напряжения.

Предположим, что сопротивление нагрузки не изменяется, а входное напряжение увеличивается (уменьшается). Если бы никаких изменений с транзистором

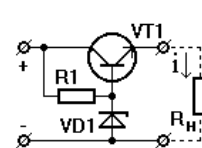


Рис. 4.20

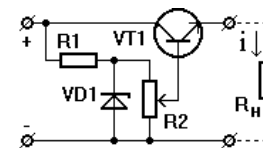


Рис. 4.21

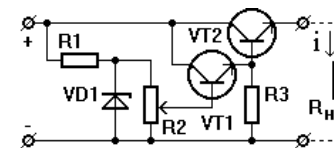


Рис. 4.22

VT1 не происходило, то напряжение на нагрузке  $R_H$  увеличилось (уменьшилось) бы. Напряжение на стабилитроне равно сумме напряжения на переходе база-эмиттер транзистора и напряжения на нагрузке. При увеличении напряжения

на нагрузке напряжение база-эмиттер транзистора уменьшается. В результате ток коллектора транзистора уменьшается и напряжение на нагрузке уменьшается, стремясь к своему первоначальному значению (никогда его не достигая).

Теперь рассмотрим случай, когда входное напряжение неизменно, а изменяется сопротивление нагрузки. Пусть сопротивление нагрузки уменьшается. Если бы при этом не происходило никаких изменений с транзистором, то напряжение на нагрузке уменьшилось бы. Уменьшение напряжения на нагрузке при неизменном напряжении на стабилитроне приведет к увеличению напряжения база-эмиттер транзистора VT1, в результате чего увеличится ток коллектора и напряжение на нагрузке тоже будет увеличиваться. Своего первоначального значения напряжение на нагрузке, конечно, не достигнет.

На рисунке 4.21 приведена схема компенсационного стабилизатора постоянного напряжения, в котором имеется возможность плавно регулировать величину выходного напряжения. Однако в таком стабилизаторе напряжения выходное напряжения будет изменяться при изменении сопротивления нагрузки. Это обусловлено тем, что при изменении сопротивления нагрузки изменяется сила тока, протекающего через верхнюю часть переменного резистора R2. Существенно уменьшить влияние сопротивления нагрузки на выходное напряжение позволяет стабилизатор, собранный по схеме рисунка 4.22.

Стабилизатор, собранный по схеме рисунка 4.23, имеет электронный предохранитель, ток срабатывания которого регулируется резистором R2. После

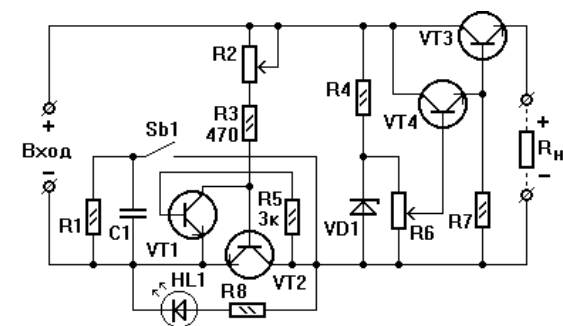


Рис. 4.23

устранения короткого замыкания в нагрузке, или перегрузки по току предохранитель возвращает в рабочее состояние с помощью кнопки Sb1. Светодиод HL1 является индикатором срабатывания предохранителя. Если ток нагрузки превысит номинальный ток срабатывания предохранителя, то начнет увеличиваться напряжение между коллектором и эмиттером транзистора VT2. Транзистор VT1 начнет открываться, закрывая транзистор VT2. Транзисторы VT1, VT2 будут переходить из одного состояния в другое лавинообразно, подгоняя друг друга. При срабатывании электронного предохранителя ток короткого замыкания в нагрузке очень мал, так как он протекает через резисторы R5, R8, а транзистор

VT2 закрыт. Наличие конденсатора C1 позволяет нажимать кнопку Sb1 даже при коротком замыкании в нагрузке. Резистор R1 обеспечивает разрядку конденсатора C1. При отсутствии электронного предохранителя и коротком замыкании в нагрузке очень велика вероятность выхода из строя транзисторов VT3, VT4.

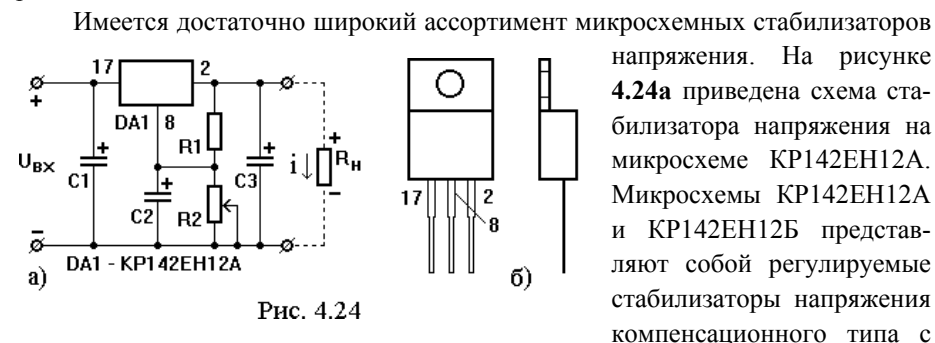


Рис. 4.24

защитой от короткого замыкания. Масса микросхемы не более 2,5г. Вид микросхемы показан на рисунке 4.24б. Внешний делитель напряжения на резисторах R1, R2 позволяет регулировать выходное напряжение от 1,3 до 37В. Максимально допустимое входное напряжение 45В, выходное напряжение 37В, ток нагрузки 1А. Максимальная мощность, рассеиваемая микросхемой без теплоотвода, при температуре окружающей среды от -10°C до +40°C равна 1Вт. Мощность, рассеиваемая микросхемой с теплоотводом, не должна превышать 10 Вт. Микросхема имеет защиту от перегрузки по выходному току.

На рисунке 4.25 показана схема стабилизатора тока на биполярном транзисторе, а на рисунке 4.26 – на полевом транзисторе. Резистор R3 и стабилитрон VD1 образуют параметрический стабилизатор постоянного напряжения.

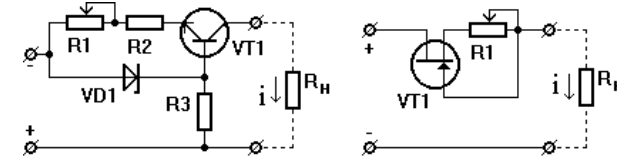


Рис. 4.25

Рис. 4.26

Рассмотрим принцип работы стабилизатора тока. К нестабильности тока через нагрузку может приводить как изменение сопротивления нагрузки, так и изменение входного напряжения. Предположим, что сопротивление нагрузки остается неизменным, а увеличивается входное напряжение. Если бы никаких изменений не происходило с транзистором, то ток через Rн увеличился бы. В результате этого увеличится ток, протекающий через резисторы R1, R2, а, следовательно, и напряжение на этих резисторах. Напряжение

на стабилитроне равно сумме напряжений на резисторах R1, R2 и на переходе база-эмиттер транзистора (переход база-эмиттер транзистора включен в прямом направлении). Напряжение на стабилитроне при изменении входного напряжения остается практически неизменным, значит, напряжение на переходе база-эмиттер транзистора уменьшится и увеличится сопротивление между выводами эмиттер-коллектор транзистора. Ток, протекающий через коллектор-эмиттер транзистора и резистор нагрузки, будет уменьшаться, стремясь к своему первоначальному значению. Таким образом, будет обеспечиваться стабилизация тока.

Пусть теперь остается неизменным входное напряжение, а увеличивается сопротивление нагрузки. Если бы никаких изменений в этом случае не происходило с транзистором, то ток нагрузки уменьшился бы. При уменьшении тока нагрузки уменьшится ток, протекающий через резисторы R1, R2 и напряжение на этих резисторах уменьшится. В результате увеличится напряжение между базой и эмиттером транзистора и ток коллектора транзистора увеличится. Ток нагрузки будет стремиться к своему первоначальному значению, никогда его не достигая. Для увеличения стабильности тока в качестве транзистора VT1 используют составной транзистор.

Очень простыми получаются стабилизаторы постоянного тока с использованием полевых транзисторов (рис. 4.26). Ток нагрузки протекает через резистор R1. Ток, протекающий в цепи: плюс источника, сток-затвор полевого транзистора, резистор Rн, минус источника питания, очень мал, так как переход сток – затвор транзистора смещен в обратном направлении. Напряжение на резисторе R1 имеет полярность плюс слева, минус справа. Потенциал затвора равен потенциалу правого вывода резистора R1, следовательно, потенциал затвора относительно истока будет отрицательным. При уменьшении сопротивления нагрузки ток через резистор R1 стремится увеличиться, в результате чего потенциал затвора относительно истока становится более отрицательным и транзистор закрывается в большей степени. При большем закрытии транзистора VT1 ток через нагрузку уменьшается, стремясь к своему первоначальному значению.

#### 4.5. Импульсные блоки питания

В настоящее время широко применяются импульсные (ключевые) источники электропитания (например, в современных телевизорах и персональных компьютерах), обеспечивающие стабилизацию напряжения. Эти источники характеризуются высоким коэффициентом полезного действия, имеют малые размеры и массу. Уменьшение массы источника обусловлено исключением из

схемы силового трансформатора, работающего на частоте 50 Гц, и введением высокочастотного трансформатора, работающего на частоте 20 – 50 кГц. Высокочастотный трансформатор устраняет гальваническую связь между выходом источника питания и питающей сетью. Структурная схема импульсного источника питания приведена на рисунке 4.27. Сетевое напряжение выпрямляется и подается на импульсный преобразователь, который вырабатывает прямоугольные импульсы напряжения частотой 20-50 кГц. К выходу импульсного преобразователя подключается обмотка I трансформатора T1. Импульсный преобразователь за счет наличия обратной связи обеспечивает стабилизацию выходного напряжения импульсного источника питания. Напряжение обратной связи

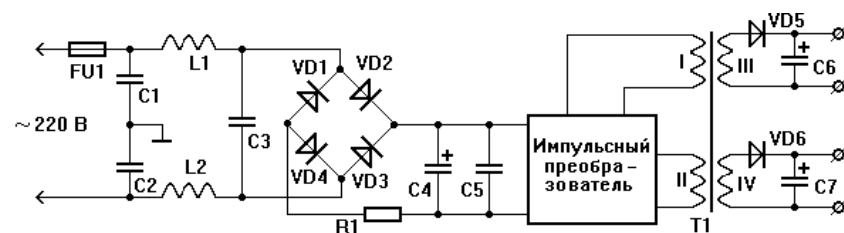


Рис. 4.27

снимается с вторичных обмоток трансформатора T1. Регулирующий транзистор в импульсном преобразователе работает в ключевом режиме: он либо полностью открыт, либо полностью закрыт. По этой причине потери мощности в регулирующем транзисторе незначительны и коэффициент полезного действия импульсных источников питания получается существенно больше по сравнению со стабилизаторами, у которых регулирующие транзисторы работают в линейном режиме. Обычно ставят два ключевых транзистора, работающих поочередно. В коллекторные цепи ключевых транзисторов включается обмотка I трансформатора через конденсатор. Мощность, передаваемая во вторичную цепь трансформатора T1, определяется временем открытого состояния ключевых транзисторов. Переменное напряжение высокой частоты с вторичных обмоток трансформатора выпрямляется полупроводниковыми диодами VD5, VD6.

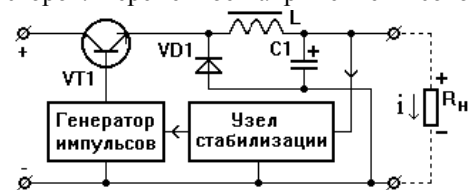


Рис. 4.28

На выходе выпрямителей ставят индуктивно-емкостные фильтры (на рис. 4.27 не показаны). Импульсные источники питания обычно имеют защиту от перегрузок по току и от короткого замыкания в нагрузке. Основными недостатками импульсных источников

питания являются сложность схемы и наличие высокочастотных помех. Уменьшению высокочастотных помех, проникающих в сеть питания, способствует фильтр C1, C2, C3, L1, L2.

В ключевых стабилизаторах постоянного напряжения, структурная схема одного из которых приведена на рисунке 4.28, в качестве накопителя энергии используется катушка индуктивности L на ферритовом магнитопроводе. Ключевой транзистор VT1 открывается прямоугольными импульсами напряжения, вырабатываемыми генератором импульсов. За время открытого состояния транзистора ток в катушке индуктивности нарастает. После закрытия транзистора ток через катушку индуктивности поддерживается за счет ЭДС самоиндукции и протекает по цепи: правый вывод катушки индуктивности, резистор нагрузки, диод VD1, левый вывод катушки индуктивности. За счет энергии катушки индуктивности конденсатор C1 продолжает заряжаться и после закрытия транзистора.

На рисунке 4.29 приведена практическая схема стабилизатора постоянного напряжения с выходным напряжением 5 В. Ключевым транзистором является транзистор VT3. При подключении к источнику постоянного напряжения конденсатор C2 первоначально разряжен и транзистор VT4 будет закрыт. Следовательно, транзистор VT1 будет также закрыт, а транзисторы VT2, VT3 будут открыты. Конденсатор C2 начнет заряжаться через катушку индуктивности L1. При определенном напряжении на конденсаторе C2 откроются транзи-

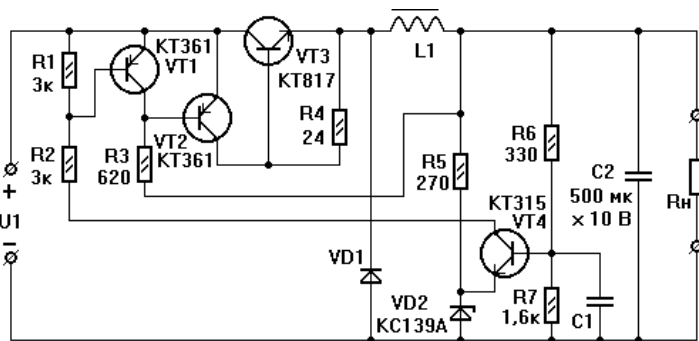


Рис. 4.29

сторы VT4, VT1, а транзисторы VT2, VT3 закроются. После закрытия транзистора VT3 конденсатор C2 еще некоторое время будет заряжаться за счет энергии, накопленной катушкой индуктивности L1. Этот ток будет протекать по цепи: правый вывод катушки индуктивности, конденсатор C2, диод VD1,

левый вывод катушки индуктивности. При уменьшении напряжения на конденсаторе транзистор VT4 закроется, и процесс будет периодически повторяться. Частота переключения транзистора VT3 будет зависеть от тока нагрузки. Точное значение напряжения стабилизации подбирается резистором R6. На вход стабилизатора подается постоянное напряжение 8-12 В.

Для уменьшения потерь в ключевых транзисторах во время перехода их из открытого состояния в закрытое и наоборот необходимо использовать высокочастотные транзисторы. Ключевые стабилизаторы постоянного напряжения иногда используют на входе компенсационных стабилизаторов. Это позволяет получить большой коэффициент полезного действия и небольшие пульсации напряжения на выходе стабилизатора.

### 5.1. Классификация усилителей электрических колебаний

Усилитель электрических колебаний можно рассматривать как черный ящик с шестью клеммами: 2 клеммы для подключения источника сигнала, 2 клеммы для подключения нагрузки и 2 клеммы для подключения источника питания (рис. 5.1). Одна из клемм источника сигнала, нагрузки и источника питания соединяется с корпусом усилителя.



Рис. 5.1

Усилители электрических колебаний могут усиливать колебания по напряжению, по току, по мощности. Усиление электрических колебаний осуществляется за счет энергии источника постоянного тока. Таким образом, в усилителе происходит преобразование энергии источника постоянного тока в энергию усиливаемого сигнала. Усилители постоянного тока можно рассматривать как усилители электрических колебаний нулевой частоты.

Классификацию усилителей электрических сигналов можно проводить по различным признакам. По *виду усиливаемых сигналов* усилители подразделяют на усилители гармонических сигналов и усилители импульсных сигналов. По *типу используемых в усилителе усилительных элементов* усилители подразделяют на магнитные, диэлектрические, ламповые, транзисторные и др. По *назначению* усилители подразделяют на телевизионные, измерительные, антенные, усилители звуковой частоты и т.д. Усилители электрических колебаний звуковой частоты называют также усилителями низкой частоты. Усилители подразделяют на усилители переменного тока (не усиливающие постоянную составляющую сигнала), и усилители постоянного тока (усиливающие сигналы в полосе частот от нуля до некоторой рабочей частоты).

Под усилителями высокой частоты понимают усилители, усиливающие модулированные сигналы высокой частоты. Под усилителями низкой частоты понимают усилители первичных не преобразованных электрических сигналов. Полоса частот электрических колебаний, усиливаемых такими усилителями, может существенно превышать верхнюю частоту звуковых колебаний, например, видеосигнал в телевизоре.

По *виду зависимости коэффициента усиления усилителя от частоты* выделяют резонансные, полосовые и широкополосные усилители. В резонансных усилителях усиление в зависимости от частоты изменяется по такому же

закону, как и сопротивление параллельного колебательного контура. В полосовых усилителях усиление почти неизменно в определенной полосе частот и резко уменьшается за ее пределами. Резонансные и полосовые усилители называют также избирательными или селективными усилителями. Широкополосные усилители обеспечивают усиление в широкой полосе частот, порядка десятков и сотен мегагерц, например, антенные усилители телевизионных сигналов.

### 5.2. Обобщенная схема усилительного каскада

Обобщенная схема усилительного каскада показана на рисунке 5.2а. Под действием управляющего напряжения  $U_{вх}$  изменяется сопротивление, а, следовательно, и сила тока в выходной цепи усилительного элемента. Обычно ток в

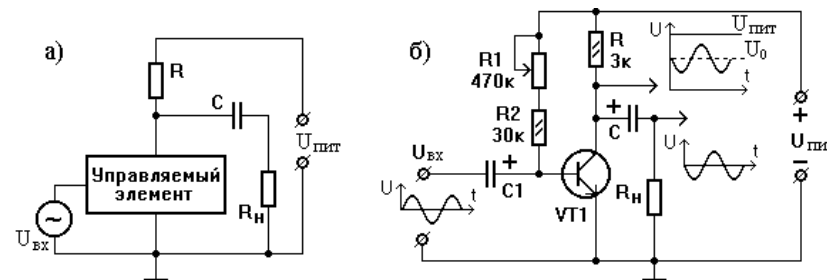


Рис. 5.2

выходной цепи элемента изменяется по такому же закону, как и входное управляющее напряжение. Резистор  $R$  и выходные зажимы управляемого элемента образуют резистивный делитель напряжения питания  $U_{пит}$ . Управляемый элемент обеспечивает преобразование энергии источника постоянного напряжения в энергию переменного напряжения на частоте усиливаемого сигнала. В качестве управляемых элементов используются электронные лампы, биполярные и полевые транзисторы. Управляемые элементы называют также усилительными элементами.

На рисунке 5.2б показана схема усилителя, в котором роль управляемого элемента выполняет биполярный транзистор  $VT1$  вместе с резисторами  $R1$ ,  $R2$  и конденсатором  $C1$ . Резисторы  $R1$ ,  $R2$  и конденсатор  $C1$  необходимы для задания рабочей точки биполярного транзистора.

### 5.3. Режимы работы усилительных элементов

Усилительные элементы могут работать в различных режимах. Режимом  $A$  работы усилительного элемента называют такой режим, при котором ток в

выходной цепи существует в течение всего периода усиливаемого сигнала. В режиме В ток в выходной цепи усилительного элемента существует в течение чуть больше половины периода усиливаемого сигнала, а в режиме С - чуть меньше половины периода. Режимом D, или ключевым режимом, называют такой режим, при котором усилительный элемент может находиться в одном из двух состояний: либо полностью открыт, либо полностью закрыт.

Рабочие точки усилительного элемента на зависимости выходного тока элемента  $i_{\text{вых}}$  от входного напряжения  $U$  для режимов А, В, С (рис. 5.3а) обозначены соответствующими буквами. Зависимость выходного тока усилительного элемента от входного напряжения при включенном в выходную цепь эле-

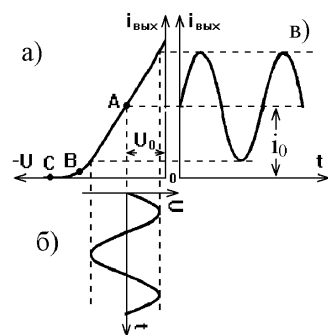


Рис. 5.3

мента резисторе нагрузки называется **проходной динамической характеристикой**. Проходная динамическая характеристика позволяет построить график зависимости выходного тока элемента от времени, если известен закон изменения входного напряжения от времени. В режиме А в отсутствии усиливаемого сигнала на входе элемента имеется напряжение  $U_0$ , а в выходной цепи протекает ток  $i_0$  (рис. 5.3в), т.е. можно сказать, что рабочая точка усилительного элемента задается входным постоянным напряжением  $U_0$  и выходным постоянным током  $i_0$ . Для режима А на рисунке 5.3 показаны зависимости от времени входного сигнала (б) и выходного тока (в). Зависимость выходного тока от времени строится по известной зависимости входного напряжения от времени. С этой целью для определенных моментов времени через точки, указывающие входные напряжения, проводят прямые, перпендикулярные оси напряжений, до пересечения с проходной характеристикой усилительного элемента и для этих моментов времени на графике (в) откладывают соответствующие значения выходного тока элемента.

Режим А используется в предварительных усилителях и в усилителях небольшой мощности, т.е. тогда, когда необходимо получить малый коэффициент нелинейных искажений, а КПД не имеет существенного значения. Режим работы А в схеме усилителя, приведенной на рисунке 5.2б, устанавливают переменным резистором, наблюдая на экране осциллографа форму выходного сигнала. В режиме А ограничения выходного сигнала отсутствуют при входных напряжениях меньше номинального, а если ограничения существуют, то они симметричны (сверху и снизу).

Режим В применяют в мощных усилителях гармонических сигналов,

построенных по двухтактной схеме: в течение одного полупериода работает один усилительный элемент, а в течение другого – другой.

Режим С не используется для усиления гармонических сигналов, а применяется там, где необходимо получить умножение частоты электрических колебаний.

Ключевой режим используется для усиления прямоугольных импульсов напряжения неизменной амплитуды с переменной длительностью (широтно-модулированные импульсы).

#### 5.4. Параметры усилителей электрических колебаний низкой частоты

В литературе усилители электрических колебаний низкой частоты называют усилителями низкой частоты. Под *усилителями низкой частоты* в данном пособии мы будем понимать усилители электрических колебаний в диапазоне частот от 20 Гц до 20 кГц.

Усилитель низкой частоты потребителем может рассматриваться как черный ящик с регулятором громкости, регуляторами тембра (если таковые имеются) и шестью клеммами, две из которых предназначены для подключения источника усиливаемого сигнала (звукосниматель, микрофон и т. д.), две - для подключения нагрузки (обычно громкоговоритель) и две - для подключения источника питания.

Рассмотрим основные параметры и характеристики усилителей низкой частоты.

**Коэффициент гармоник** усилителя представляет собой отношение мощности появившихся в выходном сигнале высших гармоник напряжения к мощности первой гармоники на выходе усилителя при условии, что сопротивление нагрузки активное, а на вход усилителя подается напряжение от генератора синусоидальной ЭДС.

$$K_r = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots}}{U_1} \quad (5.1)$$

где  $U_1, U_2, U_3$  и т.д. - действующие значения первой, второй, третьей и т.д. гармоник выходного сигнала. Для усилителей среднего класса коэффициент гармоник составляет примерно 5-7%. Для высококачественных усилителей низкой частоты коэффициент гармоник составляет десятые и даже сотые доли процента.

**Номинальная выходная мощность** усилителя - это наибольшая мощность на выходе усилителя при сопротивлении нагрузки равном выходному сопротивлению усилителя и заданном значении коэффициента гармоник.

**Номинальное выходное напряжение усилителя** - это напряжение на выходе усилителя, соответствующее номинальной выходной мощности.

**Номинальное входное напряжение или чувствительность усилителя** - это напряжение на входе усилителя, соответствующее номинальной выходной мощности.

**Максимальная выходная мощность усилителя** - это мощность на выходе усилителя при сопротивлении нагрузки равном выходному сопротивлению усилителя и коэффициенте гармоник 10 %.

**Входное сопротивление усилителя** - это сопротивление входа усилителя для переменного тока. Обычно указывают активную составляющую входного сопротивления и входную емкость.

**Выходное сопротивление усилителя** - это сопротивление выхода усилителя для переменного тока.

**Коэффициент усиления напряжения усилителя** показывает, во сколько раз переменное напряжение сигнала на выходе усилителя больше вызвавшего его напряжения на входе (при этом надо следить, чтобы коэффициент гармоник не превысил заданного значения):

$$K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} \quad (5.2)$$

Коэффициент усиления напряжения для усилителей низкой частоты обычно определяют на частоте 400 или 1000 Гц. Для определения коэффициента усиления удобно построить амплитудную характеристику усилителя.

**Амплитудная характеристика усилителя** - это зависимость выходного напряжения от входного синусоидального напряжения при неизменной частоте. Следует иметь в виду, что выходное напряжение желательно измерять электронным вольтметром, детектор которого реагирует на среднеквадратичное значение напряжения.

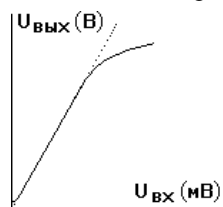


Рис. 5.4

Амплитудную характеристику усилителей низкой частоты обычно строят для частоты 1000 Гц. Примерный вид амплитудной характеристики усилителя показан на рисунке 5.4. Пунктиром показана амплитудная характеристика идеального усилителя. Амплитудная характеристика реального усилителя отличается от прямой линии в области малых и больших уровней входного сигнала.

При малых уровнях входного сигнала отклонение амплитудной характеристики от прямой линии обусловлено собственными шумами усилителя, фоном (пульсации питающего напряжения) и наводками, а при больших уровнях - нелинейностью характеристик активных элементов (транзисторов, электронных ламп и т.п.).

**Динамический диапазон усилителя** - это отношение максимального входного напряжения усилителя к минимальному входному, которое может

быть усилено при допустимых искажениях и уровне помех. Обычно динамический диапазон усилителя указывают в децибелах.

$$D = \frac{U_{\text{вх.макс}}}{U_{\text{вх.мин}}} \quad D(\text{дБ}) = 20 \lg \frac{U_{\text{вх.макс}}}{U_{\text{вх.мин}}} \quad (5.3) \quad (5.4)$$

**Уровень собственных шумов усилителя** - это отношение среднеквадратичного напряжения шумов на выходе усилителя к номинальному выходному напряжению (5.5). Обычно уровень шумов выражают в децибелах (5.6).

$$N_{\text{ш}} = \frac{U_{\text{ш.вых}}}{U_{\text{н.вых}}} \quad N_{\text{ш}}(\text{дБ}) = 20 \lg \frac{U_{\text{ш.вых}}}{U_{\text{н.вых}}} \quad (5.5) \quad (5.6)$$

Иногда указывают напряжение шумов, приведенное ко входу усилителя:

$$U_{\text{ш.вх}} = \frac{U_{\text{ш.вых}}}{K} \quad (5.7)$$

где  $U_{\text{ш.вых}}$  - напряжение шумов на выходе усилителя,  $K$  - коэффициент усиления усилителя по напряжению. Собственные шумы усилителя - это в основном тепловые шумы пассивных и активных элементов. Напряжение шумов всегда несинусоидально, не периодически.

При питании усилителей от сети переменного тока мешающее напряжение на выходе усилителя в основном обусловлено фоном переменного тока. Фон переменного тока (периодическое напряжение с частотами, кратными частоте питающей сети переменного тока) с помощью осциллографа легко отличить от тепловых шумов.

**Уровень фона переменного тока** - это отношение среднеквадратичного напряжения фона на выходе усилителя к номинальному выходному напряжению. Обычно уровень фона выражают в децибелах:

$$N_{\text{ф}} = 20 \lg \frac{U_{\text{ф.вых}}}{U_{\text{н.вых}}} \quad (5.8)$$

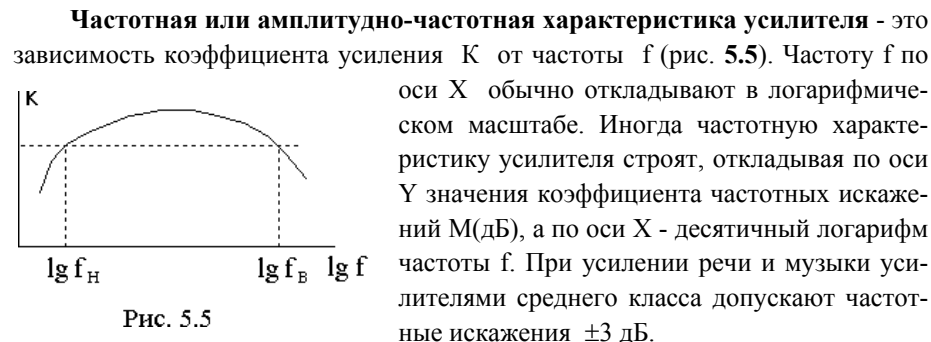
где  $U_{\text{ф.вых}}$  - напряжение фона на выходе усилителя при закороченном входе усилителя.

**Коэффициент полезного действия (КПД) усилителя** - это отношение мощности сигнала на нагрузке  $P_{\text{н}}$  к мощности  $P_0$ , потребляемой усилителем от источников питания:

$$\eta = \frac{P_{\text{н}}}{P_0} \quad (5.9)$$

**Коэффициент частотных искажений усилителя** - это отношение коэффициента усиления усилителя  $K_{\text{ср}}$  на средней частоте к коэффициенту усиления усилителя  $K_{\text{f}}$  на частоте, для которой определяется коэффициент частотных искажений. Для усилителей низкой частоты среднюю частоту берут равной 1000 Гц. Обычно коэффициент частотных искажений выражают в децибелах:

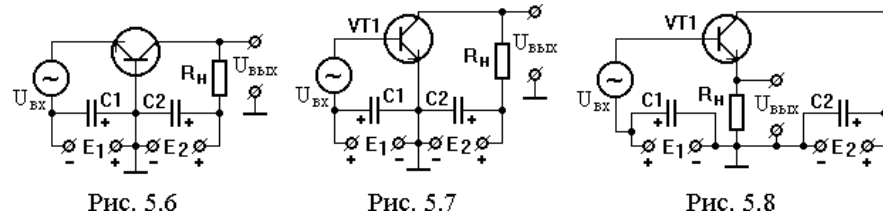
$$M = \frac{K_{\text{ср}}}{K_{\text{f}}} \quad M(\text{дБ}) = 20 \lg \frac{K_{\text{ср}}}{K_{\text{f}}} \quad (5.10)$$



**Диапазон усиливаемых усилителем частот или полоса пропускания усилителя** - это диапазон частот, в котором коэффициент частотных искажений не превышает заданного значения.

### 5.5. Усилители на биполярных транзисторах

В усилителях на биполярных транзисторах используется три схемы подключения транзистора: с общей базой (рис. 5.6; 5.9), с общим эмиттером (рис. 5.7; 5.10), с общим коллектором (рис. 5.8; 5.11).



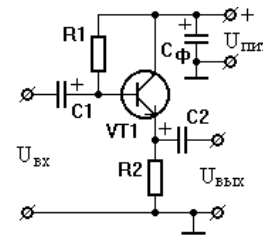
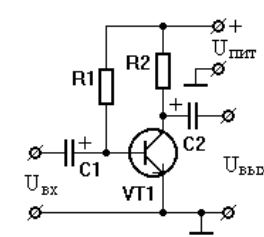
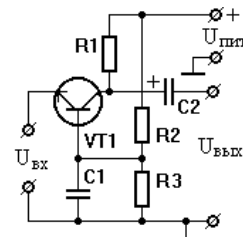
На рисунках 5.6-5.8 показаны схемы включения транзисторов с питанием входных и выходных цепей от отдельных источников питания, а на рисунках 5.9-5.11 - с питанием входных и выходных цепей транзистора от одного источника постоянного напряжения.

Усилители в схеме включения транзистора с *общей базой* характеризуются усилением по напряжению, отсутствием усиления по току, малым входным сопротивлением и большим выходным сопротивлением.

Усилители в схеме включения транзистора с *общим коллектором* характеризуются усилением по току, отсутствием усиления по напряжению, большим входным сопротивлением и малым выходным сопротивлением.

Наибольшее распространение получила схема включения с *общим эмиттером*. В схеме включения транзистора с общим эмиттером усилитель обеспечивает усиление по напряжению, по току, по мощности. Такой усилитель имеет

средние значения входного и выходного сопротивления по сравнению со схемами включения с общей базой и общим коллектором.



Сравнительные характеристики усилителей приведены в таблице:

Параметр	Схема ОЭ	Схема ОБ	Схема ОК
коэффициент усиления по току	Десятки-сотни	Немного меньше единицы	Десятки-сотни
коэффициент усиления по напряжению	Десятки-сотни	Десятки-сотни	Немного меньше единицы
коэффициент усиления по мощности	Сотни-десятки тысяч	Десятки-сотни	Десятки-сотни
Входное сопротивление	Сотни ом – единицы килоом	Единицы-десятки ом	Десятки – сотни килоом
Выходное сопротивление	Единицы – десятки килоом	Сотни килоом – единицы мегаом	Сотни ом – единицы килоом

Параметры транзистора в значительной степени зависят от температуры. Изменение температуры окружающей среды приводит к изменению рабочего режима транзистора в простой схеме усилителя при включении транзистора с общим эмиттером (рис. 5.2 б). Такая простая схема усилителя используется очень редко. Для стабилизации режима работы транзистора при изменении температуры используют схемы коллекторной (рис. 5.12, 5.13) и эмиттерной (рис. 5.14, 5.15) стабилизации режима работы транзистора.

Коллекторная температурная стабилизация режима работы транзистора по схеме рисунка 5.12 используется редко, так как кроме температурной стабилизации происходит уменьшение коэффициента усиления за счет отрицательной обратной связи по переменному току. Устранить отрицательную обратную связь по переменному току позволяет конденсатор  $C1$  в схеме, приведенной на рисунке 5.13. Такая стабилизация используется, например, в антенных усилителях для телевизионного приема.

Как в промышленных, так и в радиолюбительских конструкциях широко применяется эмиттерная температурная стабилизация режима работы транзистора. На рисунках 5.14 и 5.15 приведены схемы однокаскадных усилителей на биполярных транзисторах n-p-n и p-n-p типов с эмиттерной температурной стабилизацией режима работы транзистора.

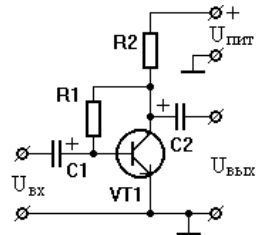


Рис. 5.12

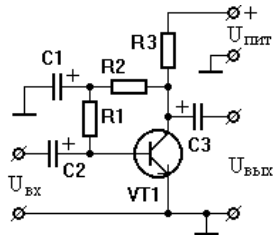


Рис. 5.13

Проследим цепи, по которым протекают постоянные токи в усилителе по схеме рисунка 5.14. Постоянный ток делителя напряжения протекает по цепи: плюс источника питания, резисторы R1, R2, минус источника питания. Постоянный ток базы транзистора VT1 протекает по цепи: плюс источника питания, резистор R1, переход база-эмиттер транзистора VT1, резистор R3, минус источника питания. Постоянный ток коллектора транзистора VT1 протекает по цепи: плюс источника питания, резистор Rk, выводы коллектор-эмиттер транзистора, резистор R3, минус источника питания.

Биполярный транзистор в составе усилителя работает в режиме **переменного тока** в прямом направлении, а переход база-коллектор - в обратном. Поэтому постоянное напряжение на резисторе R2 будет равно сумме напряжения на переходе база-эмиттер транзистора VT1 и напряжения на резисторе R3:  $U_{R2} = U_{\text{бэ}} + U_{R3}$ . Отсюда следует, что постоянное напряжение на переходе база-эмиттер будет равно  $U_{\text{бэ}} = U_{R2} - U_{R3}$ .

Пусть температура окружающей среды увеличивается. В результате этого увеличиваются постоянные токи базы, коллектора и эмиттера, т.е. изменяется рабочая точка транзистора. Ток делителя напряжения на резисторах R1, R2 выбирают значительно больше тока базы транзистора. Поэтому напряжение на резисторе R2 при изменении температуры остается практически неизменным (сопротивление резистора от температуры не зависит), а напряжение на резисторе R3 с увеличением температуры увеличивается за счет увеличения тока

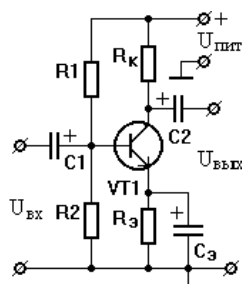


Рис. 5.14

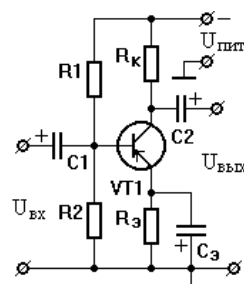


Рис. 5.15

эмиттера при неизменном сопротивлении резистора в цепи эмиттера. В результате этого напряжение база-эмиттер уменьшится, что приведет к уменьшению тока базы, а, следовательно, и силы тока коллектора. Таким образом, рабочая точка транзистора будет стремиться к исходному состоянию. Наличие резистора в цепи эмиттера приводит к появлению отрицательной обратной связи как по постоянному, так и по переменному токам. Для устранения отрицательной обратной связи по переменному току параллельно резистору R3, подключают конденсатор. Емкость конденсатора C3 выбирают так, чтобы его сопротивление переменному току на самой низкой частоте усиливаемого сигнала было значительно (примерно в десять раз) меньше сопротивления резистора в цепи эмиттера.

В усилителях низкой частоты на биполярных транзисторах применяются разделительные конденсаторы большой емкости. Это, как правило, электролитические конденсаторы, при подключении которых в электрическую цепь необходимо соблюдать полярность. Если источник усиливаемого сигнала не имеет постоянной составляющей и к выходу усилителя подключается нагрузка, не имеющая постоянного напряжения на своих зажимах, то полярность конденсаторов при использовании транзисторов n-p-n типа должна быть такой, как показано на рисунке 5.14, а для транзистора p-n-p типа - на рисунке 5.15 (изменяется полярность включения источника питания и полярность подключения конденсаторов). Емкость разделительного конденсатора (конденсатор на выходе усилительного каскада) выбирают такой, чтобы его сопротивление было много меньше входного сопротивления следующего усилительного каскада, или много меньше сопротивления нагрузки на самой низкой частоте усиливаемого сигнала.

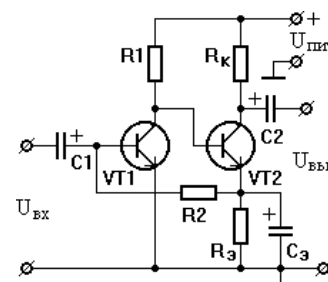


Рис. 5.16

В последнее время широко применяются двухкаскадные усилители с непосредственной связью между транзисторами (рис. 5.16). Такие усилители применяются в качестве входных усилителей низкой частоты, в качестве антенных усилителей телевизионного сигнала и др. В этих усилителях обеспечивается температурная стабилизация режима обоих транзисторов. Рассмотрим цепи, по которым протекают постоянные токи. Постоянный ток базы транзистора VT1 протекает по следующим цепям: плюс источника питания, резистор R1, переход база-эмиттер транзистора VT2, резистор R2, переход база-эмиттер транзистора VT1, общий провод, минус источника питания; плюс источника питания, резистор Rk, выводы коллектор-эмиттер транзистора VT2, резистор R2,

переход база-эмиттер транзистора VT1, общий провод, минус источника питания. Постоянный ток базы транзистора VT2 протекает по цепи: плюс источника питания, резистор R1, переход база-эмиттер транзистора VT2, резистор R3, общий провод, минус источника питания. Постоянный ток коллектора транзистора VT1 протекает по цепи: плюс источника питания, резистор R1, выводы коллектор-эмиттер транзистора VT1, общий провод, минус источника питания. Постоянный ток коллектора транзистора VT2 протекает по цепи: плюс источника питания, резистор Rк, выводы коллектор-эмиттер транзистора VT2, резистор R3, общий провод, минус источника питания.

При увеличении температуры увеличивается ток базы первого транзистора. Это приведет к увеличению тока коллектора этого транзистора и уменьшению напряжения между коллектором первого транзистора и общим проводом. В результате уменьшится ток базы второго транзистора, что приведет к уменьшению тока коллектора второго транзистора. Напряжение на резисторе R3 уменьшится, и ток базы первого транзистора будет стремиться к своему первоначальному значению.

Входные цепи чувствительного усилителя низкой частоты обязательно выполняются экранированным проводом, причем экран соединяется с корпусом усилителя в одной точке. От выбора этой точки зависит уровень мешающих напряжений.

### 5.6. Усилители на полевых транзисторах

Усилители на полевых транзисторах характеризуются очень большим входным сопротивлением. В усилителях на полевых транзисторах применяются три схемы включения транзисторов: с общим истоком (рис. 5.17), с общим затвором (рис. 5.18) и с общим стоком (рис. 5.19). Наибольшее распространение получила схема включения транзистора с *общим истоком*.

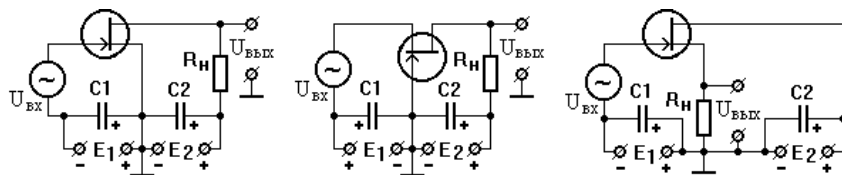


Рис. 5.17

Рис. 5.18

Рис. 5.19

На рисунке 5.20 приведена схема усилительного каскада, в котором используется один источник питания. Необходимое напряжение на затворе относительно истока получается за счет падения напряжения на резисторе R<sub>Н</sub>. Сопротивление резистора выбирают таким, чтобы при протекании через него тока истока получилось определенное из стокзатворной характеристики напряжение на затворе относительно истока транзистора. Конденсатор C<sub>И</sub>

жжение на затворе относительно истока транзистора. Конденсатор C<sub>И</sub> устраняет отрицательную обратную связь по переменному напряжению. Сопротивление резистора R<sub>3</sub> выбирают с учетом двух противоречивых требований: с одной

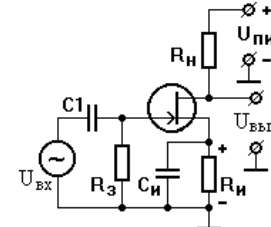


Рис. 5.20

другой стороны, взять сопротивление резистора очень большим нельзя, т.к. будет нестабильной рабочая точка транзистора. Нестабильность рабочей точки будет обусловлена температурными изменениями тока, протекающего от плюса источника питания через резистор R<sub>Н</sub>, обратно смещенный р-п переход канал-затвор транзистора, резистор R<sub>3</sub> к минусу источника. Через обратно смещенный р-п переход кремниевого полевого транзистора протекает ток около 1 нА. Сопротивление резистора R<sub>3</sub> выбирают обычно порядка 1 МОм.

### 5.7. Усилители на микросхемах

В радиоэлектронике широкое применение нашли операционные усилители. Свое название они получили потому, что первоначально проектировались для выполнения операций сложения, вычитания, интегрирования, дифференцирования и др. Операционные усилители в настоящее время выполняются на микросхемах. Основные достоинства интегральных микросхем – высокая надежность, относительно низкая стоимость, малые размеры и масса, малая потребляемая мощность.

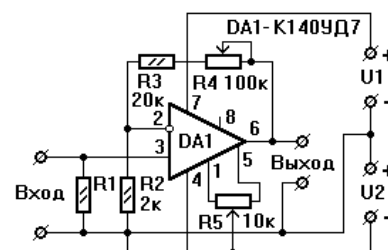


Рис. 5.21

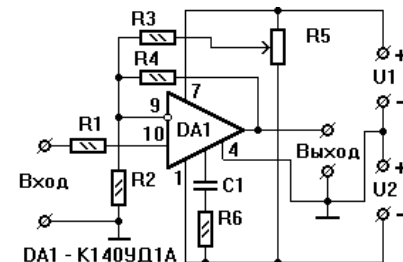


Рис. 5.22

Операционный усилитель имеет два входа и один выход. У него большое входное сопротивление, малое выходное сопротивление, большой коэффициент усиления постоянного напряжения. У идеального операционного усилителя входное сопротивление равно бесконечности, выходное сопротивление равно нулю, коэффициент усиления бесконечно велик, выходное напряжение

равно нулю при одинаковых напряжениях на обоих входах. Реальные операционные усилители имеют коэффициент усиления до  $10^5$ , полосу частот от нуля до 100 МГц, выходное напряжение, отличное от нуля при входном напряжении равно нулю. Такому выходному напряжению соответствует некоторый мнимый входной сигнал, который называют напряжением смещения нуля. Напряжение смещения нуля изменяется при изменении температуры. Напряжение смещения нуля достаточно часто компенсируют подачей внешнего постоянного напряжения противоположной полярности.

Операционные усилители питаются от двух одинаковых источников напряжения, имеющих общую точку. Один из входов операционного усилителя называется инвертирующим, а другой – неинвертирующим. Фаза сигнала на выходе усилителя совпадает с фазой сигнала на неинвертирующем входе и противоположна фазе сигнала на инвертирующем входе.

На рисунке 5.21 приведена схема неинвертирующего усилителя на микросхеме К140УД7. На рисунке показаны цепи подключения источников питания. Резистором R5 устраняется напряжение смещения нуля. Коэффициент усиления усилителя с глубокой отрицательной обратной связью определяется звеном отрицательной обратной связи на резисторах R2, R3 и R4. Коэффициент усиления по напряжению можно определить по формуле  $K = (R2 + R3 + R4) / R2$ . Полоса пропускания усилителя зависит от коэффициента усиления и достигает максимального значения 50 кГц при минимальном для данной схемы коэффициенте усиления. Минимальный коэффициент усиления получается при сопротивлении резистора R4 равном нулю.

На рисунке 5.22 приведена схема неинвертирующего усилителя на микросхеме К140УД1А. Коэффициент усиления усилителя определяется звеном обратной связи R2, R4 и равен  $K=(R2+R4)/R2$ . Резисторы R3 и R5 необходимы для устранения напряжения смещения нуля. Конденсатор C1 и резистор R6 корректируют амплитудно-частотную характеристику усилителя.

В настоящее время имеется достаточно широкий ассортимент различных усилителей, выполненных на микросхемах. Это усилители высокой частоты, усилители промежуточной частоты, усилители низкой частоты и др.

## 5.8. Особенности подключения антенных усилителей

В последние годы очень популярными стали антенные усилители для улучшения качества приема телевизионных передач. Рассмотрим на примере одной из схем усилителя особенности их подключения к телевизионным приемникам. Напряжение питания и напряжение сигнала можно подавать по отдельным проводам, но значительно удобнее использовать один и тот же ко-

аксиальный кабель (рис. 5.23). Разделение телевизионного сигнала и напряжения питания осуществляется с помощью катушек индуктивности L1, L2 и конденсаторов C6, C8. Усилитель имеет хорошую развязку по цепям питания за счет Г-образных фильтров L1C2 и R2C1. Резистор R4 обеспечивает коллекторную температурную стабилизацию режима работы первого транзистора, а резисторы R5, R6 - второго. Конденсатор C5 в цепи коллекторной стабилизации режима работы транзистора устраняет отрицательную обратную связь по переменному напряжению, за счет чего получается больший коэффициент усиления. К антенне усилитель подключается через согласующий трансформатор высокой частоты (на схеме не показан).

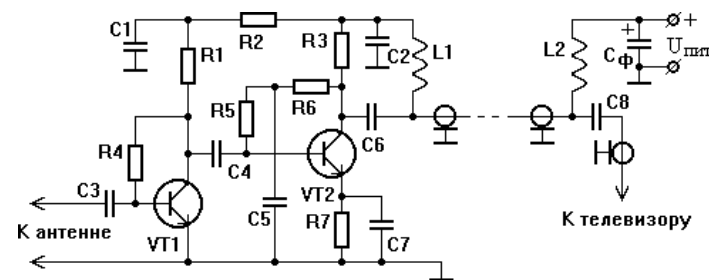


Рис. 5.23

Ток питания к антенному усилителю идет по следующей цепи: плюс источника питания, катушка индуктивности L2, центральный проводник коаксиального кабеля, катушка индуктивности L1, усилитель, внешняя проводящая оболочка коаксиального кабеля, минус источника.

Существует много вариантов построения принципиальных схем антенных усилителей, и в большинстве из них реализуется подача питания по тому же коаксиальному кабелю, по которому передается сигнал к телевизору. Установка антенных усилителей непосредственно у телевизора не дает желательного эффекта, т.к. наряду с усилением сигнала усиливаются и шумы.

## Глава VI. МОНТАЖ И ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

### 6.1. Особенности монтажа радиотехнических элементов

При монтаже радиотехнических элементов применяют скрутку (холодную пайку) и горячую пайку. Следует иметь в виду, что “холодная пайка” при эксплуатации собранного устройства может быть горячей (нагревается место скрутки проводов вследствие повышенного сопротивления), а горячая пайка всегда холодная.

Для пайки радиоэлементов обычно используют оловянно-свинцовый припой и канифольный флюс (сухая канифоль или раствор канифоли в спирте). Использовать для пайки радиоэлементов кислотный флюс нельзя, так как с течением времени электрический контакт в месте пайки может нарушиться. Пайку производят электрическим паяльником с медным наконечником. В учебных заведениях применяются паяльники, рассчитанные на напряжение 42 В.

Флюс при пайке необходим для смачивания спаиваемых поверхностей и равномерного растекания припоя. Флюс защищает место пайки от окисления. Качественная пайка получается при определенной температуре жала паяльника, а, следовательно, при определенной температуре поверхности спаиваемых деталей. При недостаточной температуре припой образует кашеобразную массу, которая при остывании не обеспечивает надежного механического и электрического контакта. При высокой температуре жала паяльника очень быстро выгорает канифольный флюс, загрязняется жало паяльника и поверхность спаиваемых деталей.

При пайке необходимо следить, чтобы жало паяльника было залужено (покрыто тонким слоем олова) и не содержало сгоревших остатков канифольного флюса. Если жало покрыто слоем окалины, то выполнить пайку радиоэлементов будет невозможно, так как теплопроводность окалины меньше теплопроводности олова и меди, следовательно, тепловой поток от паяльника к месту пайки будет существенно ослаблен, место пайки не прогреется и к нему с помощью жала паяльника нельзя доставить порцию припоя.

Перед пайкой спаиваемые детали должны быть тщательно очищены от окислов и покрыты канифольным лаком (15-20 % раствор канифоли в спирте). Подготовленные к пайке монтажные провода должны иметь оголенную часть не более 2-3 миллиметров, при пайке обмоточных проводов ПЭВ (провод эмалевый влагостойкий) необходимо удалить с поверхности провода изоляционный лак. Залуживание жала паяльника производят следующим образом: жало горячего паяльника зачищают напильником и как можно быстрее каса-

ются им флюса и припоя. Удобно пользоваться мелкой металлической сеткой, на которой находится флюс и припой. Окислы с поверхности жала паяльника удаляют, прижимая жало к поверхности металлической сетки и перемещая его; при этом канифольный флюс защищает жало от окисления. Место пайки должно прогреваться паяльником 3-5 секунд (паяльником не рекомендуется пользоваться как кисточкой).

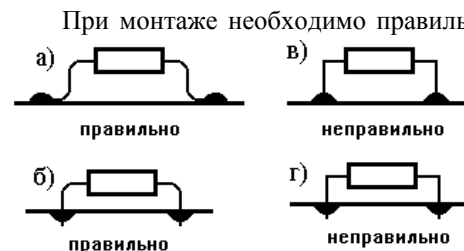


Рис. 6.1

При монтаже необходимо правильно формировать выводы радиоэлементов. На рисунке 6.1 приведены примеры правильного и неправильного формирования выводов резистора для монтажа на плате из фольгированного материала.

При пайке радиоэлементов пинцет используется не только для удержания радиоэлементов, а также в качестве теплоотвода.

Для пайки микросхем и других мелких деталей необходим паяльник с малым жалом. При отсутствии такого паяльника можно воспользоваться стандартным паяльником, намотав на его жало медный провод так, как показано на рисунке 6.2.

Перед монтажом радиоэлементов их необходимо проверить. *Резисторы проверяют* с помощью омметра, измеряя их сопротивление постоянному току. Большинство *конденсаторов* можно проверить, измеряя их емкость методом вольтметра-амперметра. *Катушки индуктивности* чаще всего проверяют, измеряя их сопротивление постоянному току. Для высокочастотных катушек это сопротивление

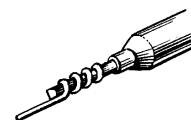


Рис. 6.2

близко к нулю. Проверить таким образом межвитковое замыкание в катушке нельзя (для его определения существуют другие способы).

*Исправность полупроводниковых диодов* проверяют омметром, измеряя сопротивление р-п перехода в прямом и обратном направлениях. В прямом направлении сопротивление диода малое, в обратном - большое (следует учесть, что омметром, выполненным по параллельной схеме, сопротивление кремниевого диода в прямом направлении измерить не удастся, так как напряжение на зажимах омметра недостаточно для преодоления потенциального барьера р-п перехода). При *проверке транзисторов* нужно проверить не только исправность двух р-п переходов, но и сопротивление между выводами эмиттер-коллектор транзистора. Оно должно быть большим.

## 6.2. Монтаж и исследование двухполупериодного выпрямителя

При расчете схем выпрямителей необходимо знать следующие электрические параметры полупроводниковых диодов:

- максимально допустимое значение амплитуды обратного напряжения;
- максимально допустимое значение амплитуды тока, протекающего через диод в прямом направлении;
- максимально допустимое среднее значение выпрямленного тока;
- максимальное значение тока через диод при максимально допустимом обратном напряжении;
- прямое падение напряжения на диоде при заданном токе через диод;
- максимально допустимое значение частоты выпрямленного переменного напряжения.

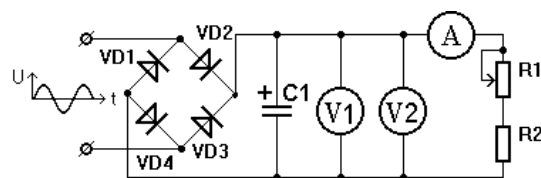


Рис. 6.3

с клемм “~” источника В-24. Это напряжение оценивают встроенным в источник вольтметром. Вольтметром V1 измеряют постоянную, а вольтметром V2

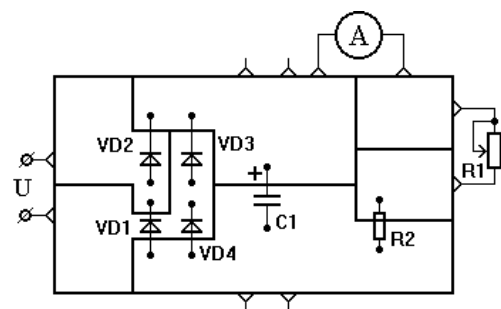


Рис. 6.4

щей выпрямленного напряжения авометр АВО-63 непосредственно без разделительного конденсатора нельзя, так как при измерении переменного напряжения он измеряет и его постоянную составляющую). Вольтметр ВЗ-38 измеряет эффективное значение переменного напряжения. При исследовании выпрямителя будем считать, что амплитуду первой гармоники можно приблизительно

Для исследования зависимости постоянной и переменной составляющих выпрямленного напряжения от тока нагрузки собирают приборы по схеме рисунка 6.3.

Переменное напряжение на вход выпрямителя подают

переменную составляющие выпрямленного напряжения. В качестве вольтметра V1 можно взять прибор Щ-4313, АВО-63 или любой другой прибор, измеряющий постоянное напряжение. Для измерения переменного напряжения (V2) используют вольтметр ВЗ-38, измеряющий только переменные напряжения (применить для измерения переменной составляющей

определить, умножив показания вольтметра ВЗ-38 на  $\sqrt{2}$ . Для измерения силы выпрямленного тока можно использовать Щ-4313, АВО-63 или любой другой прибор, измеряющий постоянный ток.

Монтажная плата рассмотренного выпрямителя приведена на рисунке 6.4. Сплошными линиями указаны области фольги, удаляемые с помощью резака. Резак можно изготовить из старого полотна ножовки по металлу. В качестве переменного резистора  $R_1$  используют магазин сопротивлений. Подключение измерительных приборов к плате производится с помощью разъемов. Сопротивления резисторов  $R_1$  и  $R_2$  выбирают такими, чтобы постоянная времени цепи разряда конденсатора фильтра могла меняться примерно от 0,1 до 10 периодов переменного напряжения на входе выпрямителя. Кроме этого резистор  $R_2$  должен иметь сопротивление такое, чтобы не превысить максимально допустимый прямой ток через полупроводниковые диоды. После того, как выбраны полупроводниковые диоды, конденсатор, рассчитаны сопротивления резисторов  $R_1$  и  $R_2$ , выбрано переменное напряжение на входе выпрямителя, определяют мощности рассеяния резисторов  $R_1$  и  $R_2$  (чтобы резисторы  $R_1$  и  $R_2$  не вышли из строя). Минимальное сопротивление резистора  $R_2$  получим, разделив максимальное напряжение, приложенное к резистору, на максимальный ток, допустимый для диодов в прямом направлении. По результатам исследования построим графики зависимостей постоянной и переменной составляющих выпрямленного напряжения и коэффициента пульсаций от тока нагрузки. Коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения можно также определить с помощью осциллографа ОМЛ-3М, измеряя постоянную и переменную составляющие выпрямленного напряжения по осциллограммам.

На рисунке 6.5 приведена схема подключения приборов, позволяющая с помощью осциллографа наблюдать форму выпрямленного напряжения для

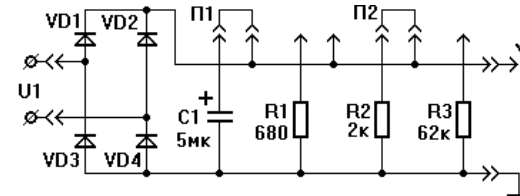


Рис. 6.5

трех существенно различающихся сопротивлений нагрузки. Среднюю из нагрузок выбирают так, чтобы произведение сопротивления нагрузки на емкость конденсатора фильтра равнялось периоду пульсаций выпрямленного напряжения.

Перед исследованием выпрямителя необходимо дать ответы на ряд вопросов. Первый и основной из них - какое максимальное напряжение можно подавать на вход исследуемого выпрямителя, чтобы не вывести из строя полупроводниковые диоды и конденсатор? При исследовании напряжение на входе выпрямителя выбирают в 3-5 раз меньше максимально допустимого.

### 6.3. Монтаж и исследование аperiodического усилителя низкой частоты на биполярном транзисторе

В усилителях на биполярных транзисторах используется три схемы подключения транзистора: с общей базой, с общим эмиттером, с общим коллектором. Наибольшее распространение получила схема включения с общим эмиттером.

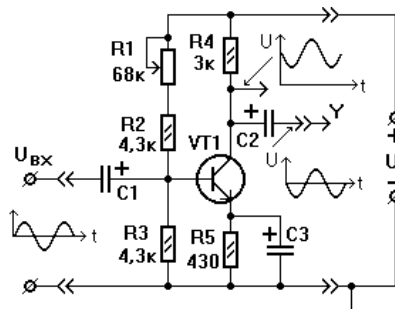


Рис. 6.6

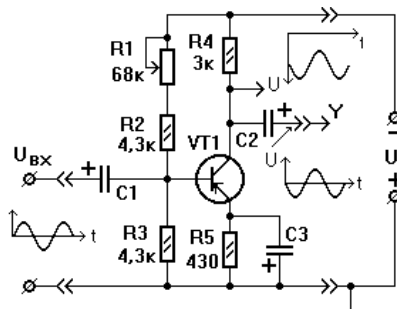


Рис. 6.7

Напомним, что входные цепи чувствительного усилителя низкой частоты обязательно выполняются экранированным проводом.

Для исследования работы усилителя по схеме рисунка 6.6 можно собрать усилитель, используя приведенную на рисунке 6.8 монтажную плату.

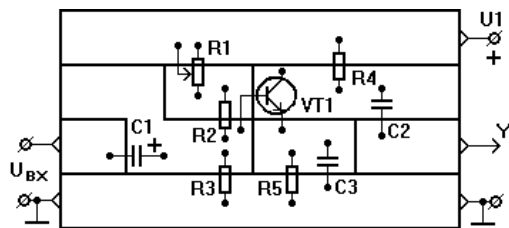


Рис. 6.8

При монтаже усилителей высокой частоты монтажная плата будет другой, т.к. необходимо уменьшить паразитные емкости монтажа. При монтаже усилителя необходимо в обязательном порядке соблюдать полярность подключения электролитических конденсаторов. На монтажной схеме показана полярность подключения только одного электролитического конденсатора. Полярность подключения двух других конденсаторов определяется по принципиальной схеме усилителя. Так как на выходе генератора синусоидальных колебаний, который будут использоваться для проверки изготовленного усилителя, нет постоянной составляющей напряжения, то полярность конденсаторов при использовании транзисторов n-p-n типа должна быть такой, как показано на рисунке 6.6, а для транзистора p-n-p типа - на рисунке 6.7.

Так как электролитические конденсаторы обладают индуктивным сопротивлением, то в высококачественных усилителях низкой частоты параллельно электролитическим конденсаторам ставят керамические конденсаторы небольшой емкости.

### Измерение чувствительности и номинальной выходной мощности усилителя низкой частоты

Предварительно задают необходимое значение коэффициента гармоник на выходе усилителя. Регулятор громкости усилителя устанавливают в положение максимальной громкости, а регуляторы тембра в среднее положение. Включают в сеть все измерительные приборы и подают питающее напряжение на усилитель. Со звукового генератора через делитель напряжения на резисторах  $R_1$ ,  $R_2$  на вход усилителя подают синусоидальное напряжение частотой 1000 Гц. Постепенно увеличивают синусоидальное напряжение на входе усилителя и одновременно измеряют коэффициент гармоник сигнала на выходе усилителя.

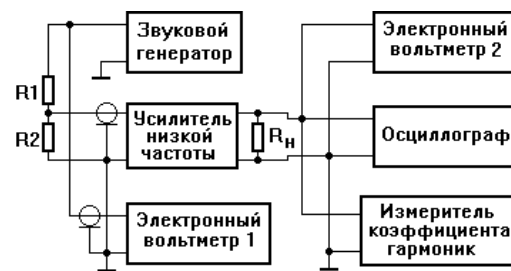


Рис. 6.9

Если отсутствует чувствительный электронный вольтметр, то напряжение на входе усилителя определяют после измерения электронным вольтметром 1 напряжения  $U_1$  на входе делителя напряжения (на резисторах  $R_1$  и  $R_2$  - рис. 6.9).

$$U_{\text{вх}} = U_1 \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (6.1)$$

При небольшой чувствительности усилителя можно обойтись без делителя напряжения, так как мешающие напряжения, возникающие при подключении к входной цепи усилителя измерительных проводов, не окажут существенного влияния на результаты измерений.

Входное напряжение  $U_{\text{н.вх}}$  характеризует чувствительность усилителя при заданном коэффициенте гармоник на выходе усилителя. Номинальную выходную мощность на нагрузке  $R_{\text{н}}$  определяют по формуле:

$$P_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н.вых}}^2}{R_{\text{н}}} \quad (6.2)$$

Коэффициент гармоник 5-8 % можно примерно определить с помощью осциллографа. При таком коэффициенте гармоник заметно искажение синусоиды на экране осциллографа. Искажение синусоиды обнаружить проще, если воспользоваться двухлучевым осциллографом и сигнал на выходе усилителя сравнить с сигналом на входе.

Таким образом, измерить чувствительность и определить номинальную выходную мощность усилителя низкой частоты при коэффициенте гармоник сигнала на выходе усилителя 5-8 % можно приблизительно без измерителя коэффициента гармоник. Максимальную выходную мощность усилителя определяют при коэффициенте гармоник 10 %.

### Измерение входного сопротивления усилителя

Входное сопротивление усилителя низкой частоты обычно измеряют на частоте 1000 Гц. Если входное сопротивление усилителя  $R_{вх}$  значительно меньше внутреннего сопротивления используемого вольтметра, то для определения

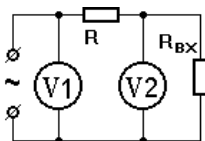


Рис. 6.10

входного сопротивления усилителя последовательно с его входом включают резистор, сопротивление которого примерно равно входному сопротивлению усилителя. Два электронных вольтметра подключают так, как показано на рисунке 6.10, где  $R_{вх}$  - входное сопротивление усилителя. Определение входного сопротивления усилителя сводится к решению следующей задачи: известны напряжения  $U_1$  и  $U_2$ , показываемые вольтметрами  $V_1$  и  $V_2$ , сопротивление резистора  $R$ ; требуется определить  $R_{вх}$ . Так как внутреннее сопротивление вольтметра  $V_2$  значительно больше входного сопротивления усилителя, то:

$$\frac{R_{вх}}{R_{вх} + R} = \frac{U_2}{U_1} \quad R_{вх} = R \frac{U_2}{U_1 - U_2} \quad (6.3)$$

Если входное сопротивление усилителя окажется соизмеримым с внутренним сопротивлением вольтметра, то определять  $R_{вх}$  таким образом нельзя.

В этом случае для определения входного сопротивления усилителя собирают приборы по схеме рисунка 6.9, но только без измерителя коэффициента гармоник. На вход усилителя подают синусоидальное напряжение частотой 1000 Гц, не превышающее по величине номинальное входное напряжение. Измеряют входное  $U_{вх1}$  и выходное  $U_{вых1}$  напряжения усилителя и определяют коэффициент усиления напряжения  $K = U_{вых1}/U_{вх1}$ . Затем последовательно со входом усилителя включают резистор  $R$  и, не изменяя напряжения на выходе звукового генератора, измеряют напряжение на выходе усилителя  $U_{вых2}$ . Напряжение на выходе усилителя уменьшилось, так

как при включении резистора  $R$  последовательно со входом усилителя часть напряжения с выхода генератора падает на резисторе  $R$ , а часть - на входном сопротивлении  $R_{вх}$ . На основании законов последовательного соединения можно записать:

$$U_{вх1} = U_R + U_{R_{вх}} \quad (6.4)$$

$$U_{R_{вх}} = I \cdot R_{вх} = \frac{U_{вх1}}{R + R_{вх}} R_{вх} \quad (6.5)$$

Выразим  $U_{R_{вх}}$  и  $U_{вх1}$  через напряжения на выходе усилителя

$$U_{R_{вх}} = \frac{U_{вых2}}{K} \quad U_{вх1} = \frac{U_{вых1}}{K} \quad (6.6) \quad (6.7)$$

Подставив (6.6) и (6.7) в (6.5) получим:

$$U_{вых2} = \frac{U_{вых1} R_{вх}}{R + R_{вх}} \quad (6.8)$$

Из (6.8) получим выражение для входного сопротивления усилителя:

$$R_{вх} = R \frac{U_{вых2}}{U_{вых1} - U_{вых2}} \quad (6.9)$$

Для повышения точности определения  $R_{вх}$  необходимо, чтобы сопротивление резистора  $R$  было одного порядка с входным сопротивлением усилителя  $R_{вх}$ .

### Измерение выходного сопротивления усилителя

Выходное сопротивление усилителя определяют из закона Ома для полной цепи

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_n + R_{вн}} \quad (6.10)$$

где  $R_n$  - сопротивление нагрузки,  $R_{вн}$  - внутреннее (выходное) сопротивление источника. Учитывая, что напряжение на зажимах источника  $U = I \cdot R_n$  из (6.10) получим

$$U = \mathcal{E} - I \cdot R_{вн} \quad (6.11)$$

Отключим  $R_n$ , тогда ток  $I$  будет очень маленьким, следовательно, напряжение на зажимах источника  $U$  будет равно электродвижущей силе  $\mathcal{E}$ . Подключим  $R_n$ . Тогда падение напряжения внутри источника  $(\mathcal{E} - U_{Rn})$  будет относиться к падению напряжения на нагрузке  $U_{Rn}$  как внутреннее сопротивление источника относится к сопротивлению нагрузки

$$\frac{\mathcal{E} - U_{Rn}}{U_{Rn}} = \frac{R_{вн}}{R_n} \quad (6.12)$$

$$R_{вн} = R_n \left( \frac{\mathcal{E}}{U_{Rn}} - 1 \right) \quad (6.13)$$

Для более точного определения внутреннего (выходного) сопротивления усилителя необходимо взять сопротивление  $R_n$  одного порядка с внутренним.

Выходное сопротивление усилителя измеряют обычно на частоте 1000 Гц. От звукового генератора на вход усилителя подают синусоидальное напряжение 1000 Гц такое, чтобы при отключенной нагрузке коэффициент гармоник сигнала на выходе усилителя не превышал заданного для данного усилителя значения.

Для определения выходного сопротивления  $R_{вых}$  измеряют выходное напряжение усилителя дважды. При отключенной нагрузке выходное напряжение будет равно ЭДС, а при подключенной -  $U_{Rn}$ .

Выходное сопротивление усилителя определяют по формуле

$$R_{вых} = R_n \left( \frac{\mathcal{E}}{U_{Rn}} - 1 \right) \quad (6.14)$$

### Построение амплитудной характеристики

Важную информацию о качестве усилителя можно получить из амплитудной характеристики. Для снятия амплитудной характеристики собирают прибор по схеме рис. 6.9, исключив измеритель гармоник. Со звукового генератора на вход усилителя подают синусоидальное напряжение частотой 1000 Гц такое, чтобы стало заметным отличие сигнала на выходе усилителя от синусоидального. Полученное значение входного напряжения увеличивают примерно в 1,5 раза и измеряют выходное напряжение усилителя электронным вольтметром. Полученные значения входного и выходного напряжения усилителя дадут одну из точек (крайнюю) амплитудной характеристики усилителя. Затем, уменьшая входное напряжение, снимают зависимость выходного напряжения от входного. Из амплитудной характеристики усилителя легко определяется коэффициент усиления по напряжению  $K = U_{вых}/U_{вх}$ . Входное и выходное напряжения усилителя для определения коэффициента усиления необходимо выбирать на линейном участке амплитудной характеристики. В этом случае коэффициент усиления усилителя не будет зависеть от входного напряжения.

### Измерение уровня собственных шумов усилителя

Для определения уровня собственных шумов усилителя измеряют выходное напряжение усилителя, подключив к входу усилителя резистор, сопротивление которого равно входному сопротивлению усилителя. Уровень собственных шумов усилителя выражают в децибелах – формула (5.6). Для уменьшения влияния наводок от внешних электромагнитных полей входные цепи усилителя

тщательно экранируют.

### Определение коэффициента полезного действия усилителя

Коэффициент полезного действия усилителя определяют при подаче на вход синусоидального напряжения частотой 1000 Гц соответствующего номинальной выходной мощности. Определяют номинальную выходную мощность по формуле (6.2)

Мощность, потребляемую усилителем от источников (источника), определяют по формуле  $P_0 = I \cdot U$ , где  $I$  - ток, потребляемый от источника,  $U$  - напряжение на клеммах усилителя, предназначенных для подключения источника питания (схему подключения амперметра и вольтметра выбирают с учетом минимальной погрешности определения потребляемой усилителем мощности в зависимости от имеющихся в наличии амперметра и вольтметра).

### Определение диапазона усиливаемых частот

Для определения диапазона усиливаемых частот и коэффициента частотных искажений строят частотную (амплитудно-частотную) характеристику.

Из определения амплитудно-частотной характеристики усилителя следует, что для ее построения на вход усилителя можно подавать любое напряжение, соответствующее линейному участку амплитудной характеристики. Однако при слишком маленьких входных напряжениях могут появиться погрешности, обусловленные шумами и фоном переменного тока. При больших входных напряжениях могут проявиться нелинейности элементов усилителя. Поэтому амплитудно-частотную характеристику обычно снимают при входном напряжении, соответствующем выходной мощности, равной 0,1 от номинальной.

Приборы для снятия амплитудно-частотной характеристики собирают по схеме рис. 6.9, причем измеритель гармоник и осциллограф можно не подключать.

Диапазон усиливаемых частот определяется из амплитудно-частотной характеристики с учетом допустимых частотных искажений. Амплитудно-частотная характеристика усилителя - это зависимость коэффициента усиления по напряжению от частоты. Из рис. 5.5 видно, как определить диапазон усиливаемых усилителем частот (полоса пропускания) при уменьшении коэффициента усиления на граничных частотах до 0,7 от максимального, что соответствует коэффициенту частотных искажений 3 дБ.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Для грамотной эксплуатации различных электронных приборов необходимо знать их основные параметры и учитывать эти параметры при включении приборов в электрические цепи.

Приведем основные характеристики используемых в лаборатории физической электроники источников питания и радиоизмерительных приборов.

**Источник электропитания для практикума ИЭПП-2** позволяет получить:

наименование параметра	номинальное значение	максимально допустимый ток нагрузки
стабилизированное напряжение постоянного тока	0,5 - 12 В	1 А
стабилизированное напряжение постоянного тока	12 В	1,5 А
нестабилизированное напряжение постоянного тока	0 - 36 В	0,1 А
напряжение переменного тока	12 В	0,5 А
напряжение переменного тока	36 В	1,5 А

Питание источника осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 В или 36 В частотой 50 Гц. Источник допускает изменение напряжения питающей сети от -15% до +10%.

Мощность, потребляемая источником при номинальном значении напряжения питания, не превышает 130 Вт. Суммарная нагрузка со всех выводов не должна превышать 70 Вт.

Допускаемое изменение выходного стабилизированного напряжения 12 В при изменении предельного напряжения питающей сети от -15% до +10% не превышает  $\pm 0,2$  В при токе нагрузки 1 А и  $\pm 0,5$  В при токе нагрузки 1,5 А.

Пульсация выходного стабилизированного напряжения источника при токе нагрузки 1 А не превышает  $\pm 0,07$  В.

Пульсация выходного нестабилизированного напряжения источника при токе нагрузки 0,1 А не превышает  $\pm 2$  В.

Допускаемое изменение выходных напряжений переменного тока не превышает 1 В для выхода 12 В при токе нагрузки 0,5 А и 3 В для выхода 36 В при токе нагрузки 1,5 А.

На передней панели источника установлены: внизу слева направо индикатор включения источника в сеть, тумблер включения (отключения) источника в сеть (от сети), гнезда "0,5-12В", "12В", колодка с гнездами "0-36В"; сверху

слева направо вольтметр, регулятор напряжения "0,5-12В", тумблер для переключения пределов измерения вольтметра с 20В на 40В и обратно, регулятор напряжения "0-36В".

На задней стенке источника имеется провод для подключения источника в сеть, винт для подключения проводника защитного зануления, предохранитель для сети 220В или 36В, общий предохранитель в цепи переменных напряжений 12В и 36В, отверстие для доступа к переменному резистору для регулировки тока защиты по выходу "0,5-12В", колодка с гнездами для снятия переменного напряжения 36В.

*Порядок работы с источником электропитания:*

1. Проверьте соответствие переключателя (переключатель совмещен с держателем предохранителя) и предохранителя напряжению питающей сети (220В или 36В) и току, на который он должен быть рассчитан. В случае необходимости выньте держатель предохранителя и установите его в нужное положение.
2. Установите переменным резистором (поворот оси переменного резистора осуществляется отверткой) по шкале на задней стенке необходимый ток защиты.
3. Подключите провод зануления под гайку на задней стенке источника.
4. Подключите нагрузки, рассчитав предварительно, чтобы суммарные силы токов и мощности не превышали допустимые значения.
5. Установите ручки регуляторов напряжений "0,5-12В", "0-36В" в крайнее положение против часовой стрелки.
6. Установите тумблер переключения пределов измерения вольтметра в необходимое положение (20В для выхода "0,5-12В" и 40В для выхода "0-36В").
7. Подсоедините шнур источника питания в сеть и включите источник.
8. Произведите плавную регулировку напряжения, следя за показаниями вольтметра. Убедитесь в том, что ток нагрузки не превышает максимально допустимого для данного выхода источника и суммарная потребляемая мощность от источника не превышает 70 Вт.
9. Закончив работу, выключите тумблер включения источника в сеть, отключите источник питания от сети и нагрузок.

*Примечание:* Следует помнить, что выход "0-36В" не имеет защиты от перегрузок по току, и источник может быть выведен из строя при токах нагрузки превышающих 0,1А. Если для питания одного устройства используются одновременно два выхода "0,5-12В" и "0-36В", то тумблер переключения пределов измерения вольтметра во избежание гальванической связи через вольтметр

должен быть установлен на предел 20В. В источниках питания ИЭПП-2, имеющихся в лабораториях физической электроники Брянского госпедуниверситета, установлена защита от перегрузки по току на выход "0-36В", а также изменена схема переключения пределов измерения вольтметра и при питании одного устройства с двух выходов "0,5-12В" и "0-36В" допускается любое положение тумблера переключения пределов измерения вольтметра.

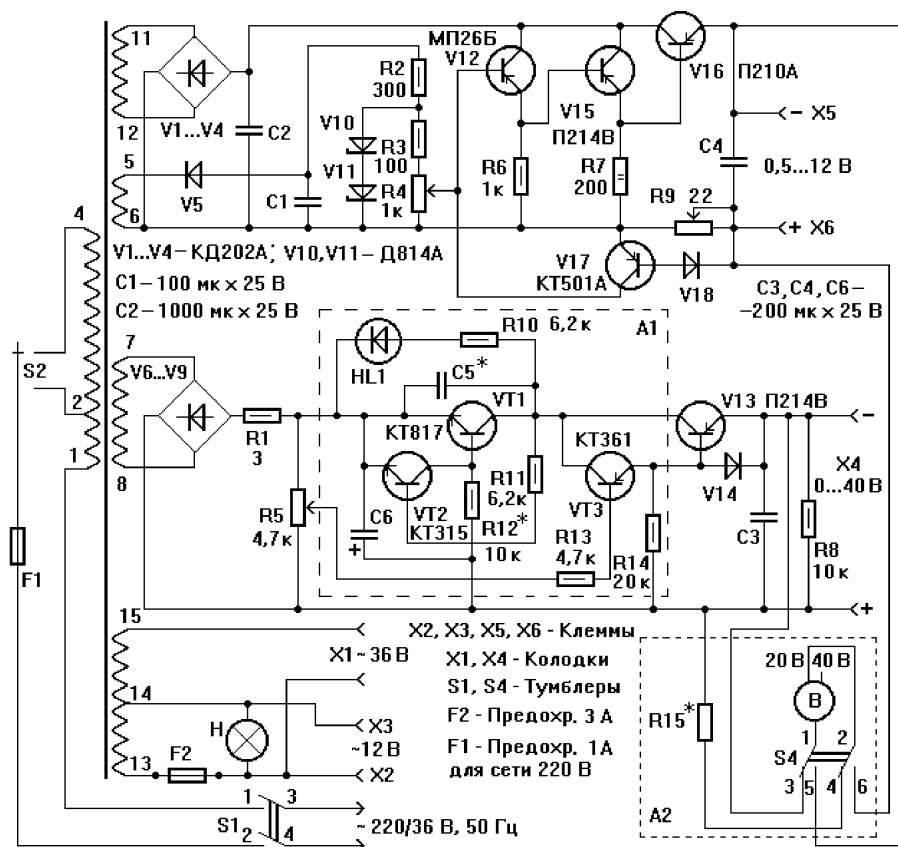


Рис. П.1

Принципиальная схема модернизированного источника электропитания ИЭПП-2 приведена на рисунке **П1**. В схему выпрямителя дополнительно введен узел А1 (показан на схеме в пунктирном прямоугольнике) и резистор R15 (подбирается экспериментально), расширяющий пределы измерения вольтметра до 40 В. Транзисторы VT1, VT2 входят в электронный предохранитель. Ток

срабатывания электронного предохранителя подбирается с помощью резистора R12. Транзистор VT3, включенный по схеме эмиттерного повторителя, позволяет уменьшить силу тока, снимаемого с делителя на резисторе R5. Светодиод HL1 служит индикатором перегрузки. Конденсатор C5 (подбирается при изготовлении электронного предохранителя) обеспечивает открытие транзистора VT1 при включении источника в сеть. Для возвращения источника в рабочее состояние после снятия перегрузки источника необходимо отключить от сети с помощью тумблера S1, выждать несколько секунд и снова включить тумблер.

## Выпрямитель ВС-24 (и его модификации ВС-24М, В-24)

Предназначен для получения регулируемого напряжения переменного тока от 0 до 30 В и постоянного (пульсирующего) от 0 до 24 В.

Питание источника осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 В или 127 В частотой 50 Гц. Максимально допустимая сила тока нагрузки - 10 А. При одновременном подключении к прибору нагрузок постоянного и переменного напряжения суммарное значение силы тока не должно превышать 10 А. Предохранитель, включаемый на напряжение сети 220 В, должен быть рассчитан на силу тока 2 А. Заменять предохранители большими по номинальному току не допускается.

На передней стенке корпуса выпрямителя расположены: вольтметр, показывающий выпрямленное напряжение; амперметр, показывающий силу выпрямленного тока; ручка плавной регулировки выходного напряжения; 2 клеммы "-" "+" и 2 клеммы "~" для подключения потребителя; лампочка-индикатор включения выпрямителя в сеть; тумблер подключения (отключения) сетевого напряжения. На задней стенке имеется зажим для подключения нулевого защитного проводника.

Принципиальная схема выпрямителя приведена на рисунке П.2.

Следует помнить, что амперметр (со шкалой на 10 А) и вольтметр (со шкалой на 50 В) включены в цепь постоянного тока. Величина переменного напряжения определяется по вольтметру приблизительно.

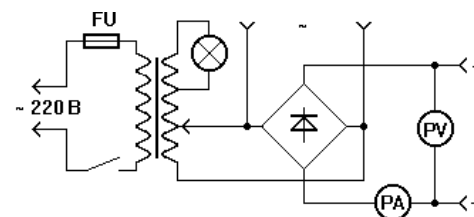


Рис. П.2

Время непрерывной работы выпрямителя не более 45 минут.

### Магазин сопротивлений измерительный РЗЗ

Применяется в качестве меры сопротивления постоянному току и дает возможность получать сопротивления от 0,1 до 99999,9 Ом.

Магазин состоит из шести декад, соединенных последовательно. Каждая декада содержит пять катушек и дает возможность получать при помощи рычажного переключателя девять номинальных сопротивлений. На панели прибора находятся ручки рычажных переключателей с лимбами. На лимбах нанесены цифры от 0 до 9, а под лимбом расположена стрелка с множителем данной декады. На панели расположены четыре зажима для включения магазина в цепь. При подключении к зажимам "0" и "0,9  $\Omega$ " включается первая декада магазина (9x0,1), при подключении к зажимам "0" и "9,9  $\Omega$ " включаются первые две декады магазина (9x0,1 и 9x1), а при подключении к зажимам "0" и "99999,9  $\Omega$ " включаются все декады магазина.

Величину сопротивления, введенного в цепь магазина, следует определять, суммируя результаты умножения чисел на лимбах, указанных стрелками, на множители у стрелок, учитывая при этом начальное сопротивление прибора. Среднее значение начального сопротивления (сопротивление при установке всех декадных переключателей на нулевые показания) не превышает 0,06 Ом.

При подключении магазина в схему нельзя допускать, чтобы токи через него превышали значения, указанные в таблице.

Декады	9x0,1	9x1	9x10	9x100	9x1000	9x10000
Допустимая сила тока, А	0,5	0,5	0,16	0,05	0,016	0,005

При пользовании магазином в схемах, во избежание сильных скачков тока при переходе с единицы на двойку по лимбу, желательно обесточить схему, особенно при работе с декадами больших сопротивлений.

Магазин сопротивления предназначен для работы при температуре окружающего воздуха от 10°C до 30°C и относительной влажности воздуха от 25% до 80% в рабочем диапазоне температур. Нормальные условия: температура (20±5)°C; относительная влажность (60±20)%. Класс точности магазина 0,2/ 6·10<sup>-6</sup>. Габаритные размеры 260x185x110 мм. Масса не более 3 кг.

**Осциллограф малогабаритный любительский ОМЛ-3М** предназначен для:

- наблюдения формы импульсов любой полярности с длительностью от 0,2 мкс до 0,1 с и размахом от 10 мВ до 300 В;
- наблюдения периодических колебаний в диапазоне частот от 3 Гц до 5 МГц;
- измерения амплитуд исследуемых сигналов от 20 мВ до 150 В;
- измерения временных интервалов от 0,4 мкс до 0,2 с.

Питание осциллографа осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 В±10 %, частотой 50 Гц. Мощность, потребляемая от сети, - 30 Вт.

Погрешность измерения амплитуд импульсных сигналов в диапазоне от 20 мВ до 150 В - не более 15 %. Погрешность измерения временных интервалов в диапазоне от 0,4 мкс до 0,2с при величине изображения по горизонтали от 4 до 6 делений - не более 15%.

Продолжительность непрерывной работы осциллографа - не более 8 часов.

Максимально допустимые величины постоянного и переменного напряжения, подаваемого на вход "У" осциллографа, можно определить, умножив число делений по вертикали (6 делений) на цену деления включенного в данный момент переключателя "В/дел".

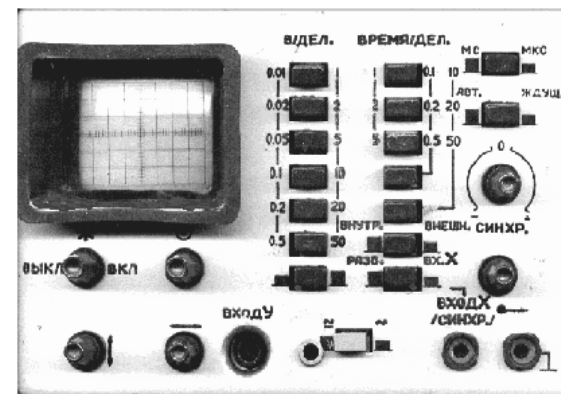


Рис. П.3

Внешний вид лицевой панели осциллографа ОМЛ-3М показан на рисунке П.3, а структурная схема представлена на рисунке П.4.

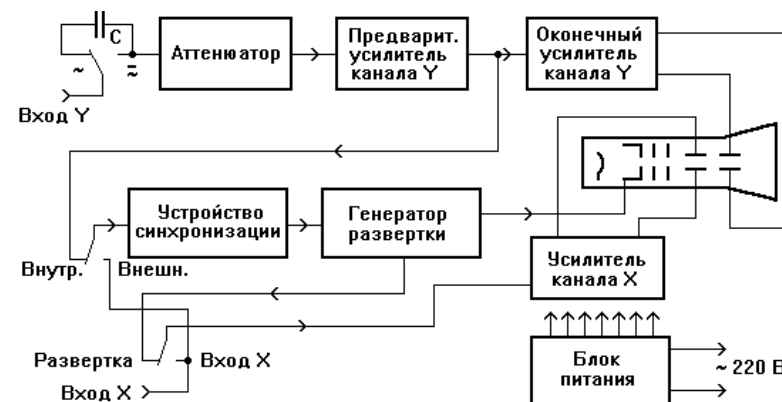


Рис. П.4

В осциллографе ОМЛ-3М имеются следующие калиброванные длительности развертки: 50 мс/дел, 20 мс/дел, 10 мс/дел, 5 мс/дел, 2 мс/дел, 1 мс/дел, 0,5 мс/дел, 0,2 мс/дел, 0,1 мс/дел, 50 мкс/дел, 20 мкс/дел, 10 мкс/дел, 5 мкс/дел, 2 мкс/дел, 1 мкс/дел, 0,5 мкс/дел, 0,2 мкс/дел, 0,1 мкс/дел.

Калиброванный коэффициент отклонения по оси У (связан с коэффициентом усиления по оси У) в осциллографе ОМЛ-3М имеет следующие значения: 50 В/дел, 10 В/дел, 5 В/дел, 2 В/дел, 1 В/дел, 0,5 В/дел, 0,2 В/дел, 0,1 В/дел, 0,05 В/дел, 0,02 В/дел, 0,01 В/дел.

*Порядок включения осциллографа:*

1. Включить вилку шнура питания в сеть 220 В, 50 Гц.
2. Установить ручки фокус, смещение по горизонтали, смещение по вертикали в средние положения.
3. Установить максимальный коэффициент вертикального отклонения 50 В/дел (при этом нижняя кнопка переключателя “В/дел” должна быть отжата).
4. Установить любую длительность развертки (кнопками “Время/дел”).
5. Установить автоколебательный режим работы развертки (кнопка “авт.-ждуш.” отжата).
6. Установить переключатель “разв.-вх.Х” в положение “разв.” (кнопка отжата).
7. Установить переключатель “внутр.-внешн.” в положение “внутр.” (кнопка отжата).
8. Включить прибор поворотом ручки “яркость” вправо до упора.
9. Добиться органами управления оптимальной яркости и фокусировки луча развертки.

Прибор готов к проведению измерений через 5 минут после включения. Для измерения параметров электрических сигналов ручками смещения сигнала

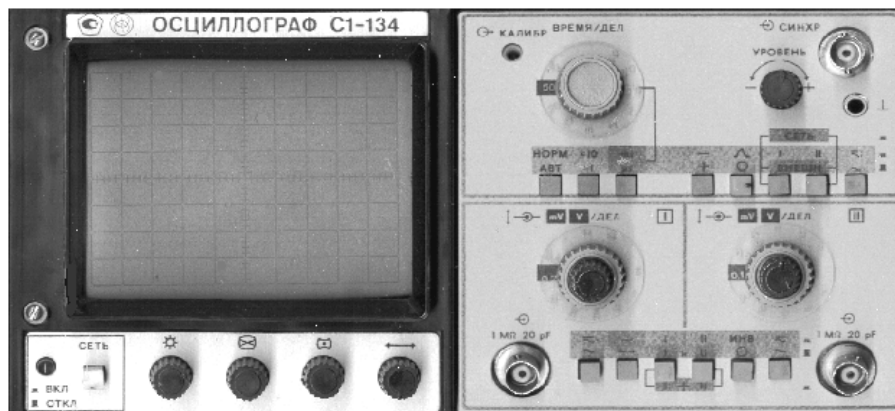


Рис. П.5

совместите сигнал с делениями шкалы так, чтобы было удобно проводить измерения. Выберите положения переключателей “В/дел” такими, чтобы размер исследуемого сигнала по вертикали получался от 2 до 6 делений.

**Осциллограф С1-134** предназначен для наблюдения сигналов, измерения их амплитуды в диапазоне от 6 мВ до 40 В и длительностей от 30 нс до 1 с. Внешний вид осциллографа С1-134 показан на рисунке П.5, а назначение органов управления приведено на рисунке П.6.

Осциллограф питается напряжением сети (220±22) В и (127±12,7) В, частотой 50 и 60 Гц; температура окружающей среды от минус 50 до 50° С; относительная влажность воздуха до (95+3) % при температуре 25° С.

В осциллографе С1-134 применена однолучевая электронно-лучевая трубка 12Л01И с зеленым цветом свечения, рабочая часть экрана 8 х 10 делений (60 х 80 мм), ширина линии луча не более 0,8 мм.

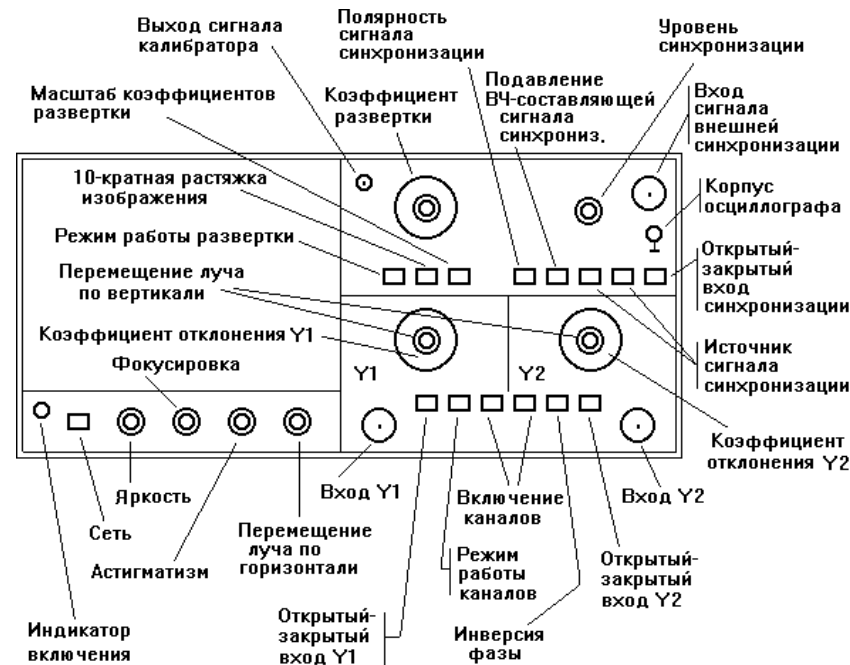


Рис. П.6

Возле каждой из кнопок или группы из двух кнопок проставлены условные обозначения выполняемых кнопками функций в зависимости от их положения. Какое положение кнопок (нажатое или отжатое) соответствует выполняемой функции можно узнать по значкам, проставленным с правой стороны на передней панели осциллографа в одной строке с условными обозначениями выполняемых функций. Знак "■" означает, что кнопка управления должна

быть отжата для выполнения указанной функции, а знак "■" – что кнопка управления должна быть нажата. Знак "□ ■" означает, что соответствующая группа кнопок управления должна быть отжата, а знак "□ ■" – что группа кнопок управления должна быть нажата.

Два переключателя "Включение каналов" позволяют выбрать один из четырех вариантов работы каналов Y1, Y2: включен канал Y1 (кнопка I нажата, кнопка II отжата), включен канал Y2 (кнопка I отжата, кнопка II нажата), включен двухканальный режим (кнопки I и II отжаты), включен режим алгебраического сложения сигналов каналов Y1, Y2 (кнопки I и II нажаты).

Переключателем "режим работы каналов" выбирают либо поочередное изображение каналов I и II после каждого хода развертки (положение переключателя "→ →"), либо прерывистое изображение каналов I и II с частотой коммутации около 50 кГц (положение переключателя "- - -", рекомендуется на низких частотах).

Переключатель "Инверсия фазы" изменяет фазу сигнала на 180 градусов.

Переключатели "Открытый – закрытый вход Y1", "Открытый – закрытый вход Y2" устанавливают соответствующие входы открытыми или закрытыми для постоянной составляющей исследуемого напряжения.

Переключатели "Коэффициент отклонения Y1", "Коэффициент отклонения Y2" обеспечивают установку одного из следующих 11 значений коэффициента отклонения 2, 5, 10, 20, 50 мВ/дел, 0,1, 0,2, 0,5, 1, 2, 5 В/дел. При открытых входах Y и минимальном коэффициенте отклонения нельзя подавать сигнал более 30 В.

Переключатель "Режим работы развертки" позволяет выбрать ждущий (НОРМ) или автоматический (АВТ) режим. В автоматическом режиме развертка запускается без сигнала, а в ждущем режиме развертка запускается только при наличии сигнала запуска. Чаще всего используется внутренний запуск генератора развертки исследуемым сигналом. Для запуска развертки используют также внешний сигнал и напряжение питающей сети.

Переключатель "10-кратная растяжка изображения" обеспечивает 10-кратную растяжку всех диапазонов развертки. Например, наименьшее значение коэффициента развертки при нажатом переключателе (положение x10) будет 10 нс/деление вместо 100 нс/деление при отжатом.

Переключатель "Коэффициент развертки" обеспечивает следующие коэффициенты развертки 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10; 20; 50; 100, задаваемые либо в ms/дел, либо в μs/дел переключателем "Масштаб коэффициентов развертки".

Переключатель "Полярность сигнала синхронизации" позволяет выбрать необходимую полярность синхронизирующего сигнала.

Если переключатель "Подавление ВЧ-составляющей сигнала синхронизации" нажат, то подавляются составляющие сигнала синхронизации с частотой выше 15 кГц. Это позволяет уменьшить влияние высокочастотных шумов на запуск развертки. В качестве примера можно привести синхронизацию кадровым импульсом телевизионного сигнала.

Два переключателя "Источник сигнала синхронизации" позволяют выбрать внутреннюю синхронизацию от каналов Y1, Y2, внешнюю синхронизацию (оба переключателя отжаты и синхронизирующее напряжение подается на "Вход сигнала внешней синхронизации") или синхронизацию от сети (оба переключателя нажаты). Синхронизацию от сети рекомендуется использовать тогда, когда частота исследуемого сигнала синхронна с частотой питающей сети. Внешняя синхронизация позволяет управлять моментом появления сигнала на развертке, если имеется сигнал для запуска с регулируемым опережением. При работе в режиме внешней синхронизации на вход синхронизации нельзя подавать сигнал с амплитудой более 30 В.

Закрытый вход синхронизации (переключатель "Открытый-закрытый вход синхронизации" в положении "∼") не пропускает постоянную составляющую запускающего сигнала и позволяет уменьшить влияние низкочастотных шумов на запуск генератора развертки. Он рекомендуется при синхронизации сигналом частотой выше 10 кГц. Открытый вход синхронизации используется для запуска развертки в диапазоне частот от 0 (постоянное напряжение) до 35 МГц.

**Прибор комбинированный цифровой Щ4313** предназначен для измерения:

- силы и напряжения постоянного тока;
- среднеквадратичного значения силы и напряжения переменного тока синусоидальной формы;
- сопротивления постоянному току.

Питание прибора осуществляется как от сети переменного тока напряжением (220±22) В и частотой 50 Гц, так и от встроенного источника постоянного тока с напряжением 12-20 В. Время непрерывной работы прибора при питании от сети - не более 24 часов.

Выбор полярности измеряемой величины осуществляется автоматически, выбор диапазона измерений и рода измеряемой величины - вручную. Время измерения не более 3 с для измерения силы тока и напряжения и 15 с для измерения сопротивления постоянному току.

Входное сопротивление вольтметра постоянного тока составляет не менее 20 МОм на пределе до 200 мВ и 1 МОм - на остальных пределах. Входное сопротивление вольтметра переменного тока (активное) - 1 МОм. Падение

напряжения на миллиамперметрах постоянного и переменного тока составляет не более 600 мВ. Эти данные необходимо учитывать при проведении точных измерений (см. подробнее на С. 36-37).

**Категорически запрещается подключать, отключать и переключать род работы и диапазоны измерений при включенном напряжении в исследуемой цепи, а также подавать на вход прибора напряжение свыше 1000 В. Появление на индикаторе показания “1” является сигналом перегрузки и необходимости переключения прибора на больший предел измерений.**

Внешний вид передней панели прибора Щ4313 приведен на рисунке П.7.



Рис. П.7

*Порядок работы:*

1. Проверить положение всех кнопок переключателей - они должны быть в отжатом состоянии.
2. Включить прибор нажатием кнопки “ПИТ”.
3. Установить род измеряемой величины и требуемый диапазон измерений нажатием соответствующих кнопок.
4. Подключить соединительные шнуры к гнездам прибора и к исследуемой цепи, произвести отсчет показаний по индикатору.
5. Определить погрешности измерения.

**Милливольтметр ВЗ-38А** предназначен для измерения среднеквадратичного значения напряжения переменного тока синусоидальной формы от 0,1 мВ до 300 В в диапазоне частот от 20 Гц до 5 МГц.

Питание прибора осуществляется от сети переменного тока напряжением (220 ± 22) В и частотой (50 ± 0,5) Гц.

Время установления рабочего режима - 15 минут. Время непрерывной работы прибора - не более 8 часов.

Активное входное сопротивление прибора, измеренное на частоте 45 Гц, составляет не менее 5 МОм на поддиапазонах с верхними пределами 1 - 300 мВ и не менее 4 МОм на поддиапазонах с верхними пределами 1 - 300 В.

На передней панели прибора расположены: показывающий прибор с

механическим корректором нуля, входная розетка для подключения измерительного кабеля, переключатель поддиапазонов измерения, индикатор включения прибора в сеть, выключатель питающего напряжения. На задней панели имеются: шнур с вилкой для подключения питающего напряжения, клемма для защитного зануления, держатель для предохранителей с плавкими вставками, гнезда для автоматического контроля.

Погрешность прибора в рабочих областях частот, выраженная в процентах от верхнего предела установленного поддиапазона, не превышает значений, указанных в таблице:

Под-диапазоны	45 Гц - 1МГц	20Гц - 45 Гц	1МГц -3МГц	3МГц-5 МГц
1 - 300 мВ	± 2,5	± 4,0	± 4,0	± 6,0
1 - 300 В	± 2,5	± 4,0	± 6,0	± 6,0

Порядок работы:

1. Подключить к прибору проводник защитного зануления.
2. При выключенном выключателе питающего напряжения проверить положение указателя прибора и при необходимости произвести установку нуля механическим корректором.
3. Установить переключатель поддиапазонов в положение, соответствующее предполагаемому значению измеряемого напряжения (если оно неизвестно, то необходимо установить поддиапазон измерения 300 В) и подать на прибор напряжение питания.
4. Подать измеряемое напряжение на входную розетку с помощью измерительного кабеля из комплекта прибора. Кабель со штепселями используют на частотах до 1 МГц, кабель со штеккером - для измерений на частотах свыше 1 МГц.
5. Произвести отсчет показаний прибора по шкале.

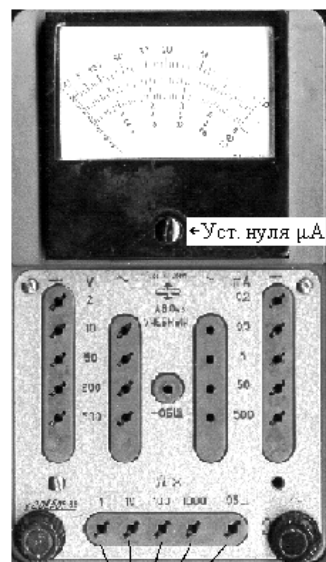
При отсутствии сигнала и замкнутом входе указатель прибора может отклоняться от нулевого деления до 5 % от значения верхнего предела установленного поддиапазона из-за собственных шумов прибора.

Необходимо помнить, что прибором можно измерять напряжение только тех источников, один полюс которых подсоединен к точке с нулевым потенциалом (заземлен). *Измерять напряжение сети прибором ВЗ-38А запрещается.* Это связано с тем, что один из измерительных проводов соединяется с корпусом прибора и к этому измерительному проводу может оказаться подключенным фазный провод сети.

С гнезд для автоматического контроля снимается постоянное напряжение, пропорциональное отклонению стрелки прибора от нулевого положения.

**Ампервольтметр (авометр) АВО-63** служит для измерения:

- силы постоянного тока с пределами 0-0,2 мА, 0-0,5 мА, 0-5 мА, 0-50 мА, 0-500 мА;
- силы переменного тока с пределами 0-0,5 мА, 0-5 мА, 0-50 мА, 0-500 мА;
- напряжения постоянного тока с пределами 0-2 В, 0-10 В, 0-50 В, 0-200 В, 0-500 В;
- напряжения переменного тока с пределами 0-10 В, 0-50 В, 0-200 В, 0-500 В;
- сопротивления с пределами 2000 Ом при умножении числа делений на 1, 20000 Ом при умножении числа делений на 10, 200000 Ом при умножении числа делений на 100, 2 МОм при умножении числа делений на 1000.



Гнезда омметра  
Установка на нуль стрелки омметра  
Переключатель рода работ

Рис. П.8

Прибором можно измерять емкости конденсаторов. Погрешность прибора при измерениях в нормальных условиях ( $20 \pm 5^\circ\text{C}$ ) не превышает  $\pm 4\%$  от максимального значения шкалы для силы тока и напряжения и  $\pm 10\%$  для сопротивления. Начальные 15% от всей длины шкалы являются нерабочими, погрешность прибора на этом участке шкалы повышена. Рабочее положение прибора - горизонтальное.

Внешний вид прибора приведен на рисунке П.8, а его принципиальная схема - на рисунке П.9. На лицевой стороне прибора укреплен микроамперметр М2003-1, имеющий три шкалы: верхняя служит для отсчета сопротивлений, средняя - для напряжения и силы переменного тока, нижняя - для силы тока и напряжения постоянного тока. Под шкалами нанесены три ряда цифр для удобства отсчета на разных пределах измерений силы тока и напряжения. На лицевой панели прибора расположены гнезда для подключения прибора с помощью соединительных проводников в электрическую цепь, переключатель рода работ и регулятор для установки стрелки прибора на нуль при измерении сопротивления. Особую конструкцию имеют гнезда 5, 50 и 500 мА переменного тока и гнездо "- Общ". При установке штекера в гнездо "- Общ" закорачивается переменный резистор R24 (смотри принципиальную схему),

используемый при измерениях сопротивлений постоянному току. При установке штекера в гнезда 5, 50 и 500 мА переменного тока расширяется предел

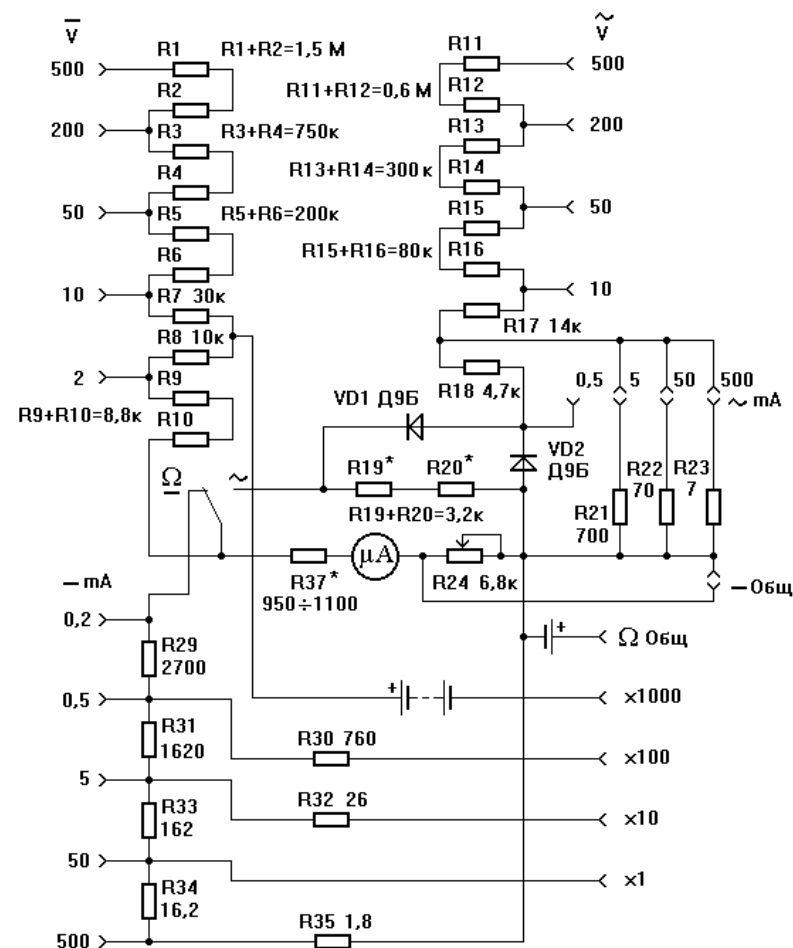


Рис. П.9

измерения переменного тока соответственно до 5, 50 и 500 мА. Использовать штекеры меньшего диаметра нельзя, так как это может привести к погрешности измерений и даже выходу прибора из строя. Так, например, если штекер будет иметь контакт только с верхним по схеме металлическим проводником гнезда "~500 мА", то перегрузка по току будет очень большой.

В комплект поставки авометра входят соединительные гибкие провода, имеющие на концах штекеры с изолирующими ручками. Короткий штекер вставляют в одно из гнезд лицевой панели, а на длинный штекер надевают зажим типа «крокодил». Провода хранят в крышке прибора.

С обратной стороны в корпусе прибора имеется отсек, где устанавливаются гальванические элементы источника питания цепи омметра. Для смены гальванических элементов необходимо отвернуть 4 винта крышки, вынуть старые гальванические элементы, зачистить в случае необходимости контакты в отсеке и вставить новые гальванические элементы с соблюдением полярности.

#### *Порядок работы с ампервольтметром:*

Перед измерением необходимо расположить прибор на горизонтальной плоскости и с помощью механического корректора стрелка микроамперметра должна быть установлена на нуль шкал постоянного или переменного тока.

##### *1. Измерение сопротивления:*

- измерения проводить только в обесточенных цепях;
- установить переключатель рода работы так, чтобы его указатель (белая точка) был расположен против обозначения “Ω”;
- вставить короткий наконечник одного соединительного провода в гнездо “общ”, расположенное в нижнем ряду, а другого - в одно из гнезд нижнего ряда (обозначенного “Ωх”) в соответствии с выбранным множителем;
- перед началом измерений установить нуль омметра, для чего замкнуть накоротко щупы соединительных проводов и вращением ручки переменного резистора установить стрелку прибора на “0” по верхней шкале с надписью “Ω” (во избежание быстрого разряда элементов, питающих цепь омметра, нельзя оставлять на длительное время щупы замкнутыми накоротко; если стрелка прибора не устанавливается на нуль при максимальном повороте головки переменного резистора, необходимо вскрыть крышку, проверить исправность элементов и при необходимости заменить их);
- отсчет производить по верхней шкале прибора с учетом выбранного множителя.

##### *2. Измерение силы тока и напряжения:*

- проверить положение ручки переключателя: указатель (белая точка) должен находиться против обозначения “Ω” для измерений в цепях постоянного тока и против обозначения “~” для измерений в цепях переменного тока;
- вставить короткий наконечник одного соединительного провода в гнездо “общ”, а другого - в одно из гнезд, соответствующее измеряемому параметру (надписи “-mA”, “~mA”, “-V”, “~V”) и необходимому пределу показаний

прибора (при первом измерении лучше выбрать заведомо больший предел);

- включить прибор при помощи щупов в измеряемую цепь, соблюдая полярность в цепях постоянного тока (провод, вставленный в гнездо “общ”, необходимо через всех потребителей соединить с “-” источника тока; если при измерении стрелка прибора отклонилась влево от нуля, то прибор был включен в цепь неправильно и щупы необходимо поменять местами);
- отсчет производить по шкале, обозначенной “-” или “~” (для постоянного и переменного тока соответственно), с учетом выбранного предела измерений.

При измерениях силы тока в цепях с малым напряжением необходимо учитывать падение напряжения на миллиамперметре:

для миллиамперметра постоянного тока		для миллиамперметра переменного тока	
предел	падение напряжения	предел	падение напряжения
0,2 мА	0,22 В	0,5 мА	0,6 В
0,5 мА	0,63 В	5 мА	3,5 В
5 мА	0,87 В	50 мА	3,5 В
50 мА	0,9 В	500 мА	3,5 В
500 мА	0,9 В		

Внутреннее сопротивление вольтметра постоянного тока равно 5000 Ом/В, внутреннее сопротивление вольтметра переменного тока равно 2000 Ом/В.

**Генератор звуковой ГЗМ (учебный)** предназначен для получения синусоидальных электрических колебаний в диапазоне частот от 20 до 20000 Гц. Указанный диапазон частот перекрывается тремя поддиапазонами. Нелинейные искажения в диапазоне частот 60-15000 Гц составляют не более 5% при номинальной выходной мощности 2 Вт на согласованной нагрузке.

Мощность на нагрузке при неизменном усилении зависит от сопротивления нагрузки и достигает максимального значения при сопротивлении нагрузки равном выходному сопротивлению генератора. Такой режим нагрузки называется согласованным. Коэффициент нелинейных искажений возрастает при увеличении усиления. Максимальная выходная мощность – не более 4 Вт.

Неравномерность частотной характеристики генератора относительно частоты 400 Гц при согласованной нагрузке не превышает  $\pm 3$  дБ.

Погрешность генератора по частоте – не более  $\pm(0,1\%f + 1)$  Гц.

На передней панели генератора имеются: сигнальная лампочка включения прибора в сеть; тумблер включения напряжения питания; зажимы "вход УНЧ"; переключатель на четыре положения "УНЧ", "x1", "x10", "x100"; регулятор

выходного напряжения "усиление"; выходные зажимы "5000 Ом", "600 Ом", "5 Ом"; зажим "общ", соединенный с корпусом генератора; ручка установки частоты, соединенная через замедлитель с диском со шкалой частот.

Выходное напряжение, соответствующее номинальной выходной мощности при согласованной нагрузке, будет 3,16 В на выходе "5 Ом" (зажимы "5 Ом" и "общ"), 34,7 В на выходе "600 Ом" (зажимы "600 Ом" и "общ") и 100 В на выходе "5000 Ом" (зажимы "5000 Ом" и "общ"). При отключенной нагрузке напряжение на выходе будет больше в два раза. При максимальном усилении и отключенной нагрузке напряжение на выходе "5000 Ом" будет более 200 В. Необходимо учитывать величину выходного напряжения генератора, чтобы не вывести из строя подключаемые к нему измерительные приборы.

Генератор звуковой можно использовать как усилитель электрических колебаний низкой частоты. Для этого переключатель устанавливают в положение "УНЧ", а громкоговоритель без трансформатора подключают к выходу "5 Ом".

*Перед включением генератора в сеть его нужно заземлить.*

**Генератор низкой частоты школьный ГНЧШ** предназначен для получения синусоидальных электрических колебаний в диапазоне частот от 20 до 20000 Гц при проведении опытов по радиотехнике на уроках физики.

Генератор имеет два выхода с выходным сопротивлением 5 Ом и 600 Ом.

Выходная мощность генератора при согласованной нагрузке на частоте 1000 Гц не менее 2 Вт.

Выходное напряжение на частоте 1000 Гц при согласованной нагрузке на выходе 5 Ом изменяется до 3,4 В, а на выходе 600 – до 36 В.

Неравномерность частотной характеристики генератора в диапазоне частот 60-15000 Гц относительно частоты 400 Гц при согласованной нагрузке не превышает  $\pm 3$  дБ.

Нелинейные искажения в диапазоне частот 60-15000 Гц составляют не более 5% при выходной мощности 1 Вт на согласованной нагрузке.

Погрешность частоты генерируемых колебаний - не более  $\pm(0,1\% f + 2)$  Гц.

Звуковой генератор можно использовать как усилитель электрических колебаний низкой частоты. Чувствительность со входа "УСИЛИТЕЛЬ" равна 25 мВ. Громкоговоритель без трансформатора подключают к выходу "5 Ом", а громкоговоритель с трансформатором – к выходу "600 Ом".

*Перед включением генератора в сеть его нужно заземлить.*

**Генератор низкой частоты школьный ГНЧШ-1** имеет встроенный цифровой частотомер.

## ЛИТЕРАТУРА

### Основная

1. Алгинин Б.Е. Кружок электронной автоматики: Пособие для руководителей кружков: Из опыта работы. - М.: Просвещение, 1990. - 192 с.
2. Бартенев В.Г., Алгинин Б.Е. От самоделок на логических элементах до микроЭВМ. - М.: Просвещение, 1993. - 189 с.
3. Богатырев А.Н. Радиоэлектроника, автоматика и элементы ЭВМ: Учеб. пособие для 8 - 9 кл. сред. шк. - М.: Просвещение, 1990. - 175 с.
4. Гершензон Е.М. и др. Радиотехника: Учеб. пособие для ст-в физ.-мат. фак. пед. ин-тов / Е.М. Гершензон, Г.Д. Полянина, Н.В. Соина. - М.: Просвещение, 1986. - 319 с.
5. Долин П.А. Действие электрического тока на человека и первая помощь пострадавшему. - М.: Энергия, 1976. - 128 с.
6. Жеребцов И.П. Основы электроники. – 5-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 352 с.
7. Комский Д.М. Кружок технической кибернетики: Пособие для руководителей кружков. - М.: Просвещение, 1991. - 192 с.
8. Основы промышленной электроники: Учеб. пособие для неэлектротехн. спец. вузов/ В.Г. Герасимов, О.М. Князьков, А.Е. Краснопольский, В.В. Сухоруков; Под ред. В.Г. Герасимова. - М.: Высш. шк., 1986. - 336 с.
9. Правила безопасности труда для кабинетов (лабораторий) физики. В кн.: Физика в школе: Сб. нормат. документов/ Сост. Н.А. Ермолаева, В.А. Орлов. - М.: Просвещение, 1987. - С.198-222.

### Дополнительная

1. Алукер Ш.М. Электрические измерения. Изд. 2-е, перераб. и доп. - М.: Колос, 1972. - 352 с.
2. Ампервольтметр АВО-63 (учебный). Паспорт.
3. Вайнштейн Л.И. Памятка населению по электробезопасности. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 64 с.
4. Городецкий И. Определитель структуры и выводов транзистора // Радио. – 1996. - №4. - С.38-39.
5. Дик Ю.И., Мигунов А.Ф. Требования к конструированию самодельных приборов по физике // Физика в школе. – 1983. - № 1. - С. 76-80.
6. Дорожнинский В. Импульсный сетевой блок питания // Радио. – 1997. - № 4. - С.52, 53.
7. Засухин С. Простой импульсный стабилизатор // Радио. – 1993.- № 6. - С.38,39.

8. Иванов Б.С. Азбука радио схем // Радио. – 1997. - № 10. - С.36, 37; № 11 - С. 36, 37; № 12. - С. 28, 29.
9. Иванов Б.С. Пайка – дело тонкое // Радио. – 1997. - № 10. - С. 40, 41.
10. Иванов Б.С. Первое дело техника безопасности// Радио.–1997.- № 10.- С.39.
11. Иванов Б.С. Электронные самоделки: Кн. для учащихся 5-8 кл. - М.: Просвещение, 1993. - 191 с.
12. Измерения в электронике: Справочник / В.А. Кузнецов, В.А. Долгов, В.М. Коневских и др.; Под ред. В.А. Кузнецова. -М.: Энергоатомиздат, 1987. - 512 с.
13. Иноземцев В.А., Иноземцева С.В. Влияние электроизмерительных приборов на режим работы электрической цепи//Учебная физика.-№ 6.-1999.- С.31-33.
14. Иноземцев В.А. Определение короткозамкнутых витков катушек индуктивности // Преподавание физики в высшей школе: Сб. науч. тр. - М.: Изд-во МПГУ, 1998. - № 13.
15. Источник электропитания для практикума ИЭПП-2. Техническое описание, инструкция по эксплуатации и паспорт.
16. Карпов Р.Г., Карпов Н.Р. Электрорадиоизмерения. – М.: Высш. школа, 1978. – 272 с.
17. Кобрин В.. Двуполярный регулируемый блок питания // Радио. – 1999. - №1. - С.45.
18. Козлов В. Стабилизатор напряжения с защитой от короткого замыкания и перегрузки по току // Радио. – 1998. - № 5. - С. 53, 54.
19. Кораблев В.П. Устройства электробезопасности. - М.: Энергия, 1979. - 72 с.
20. Кузнецов А. Устройство защиты от поражения электротоком // Радио. – 1997. - № 4. - С. 47-49.
21. Лабораторные занятия по физике: Учебное пособие / Гольдин Л.Л, Игошин Ф.Ф., Козел С.М. и др.; Под ред. Гольдина Л.Л. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. - 704 с.
22. Лабораторный практикум по общей физике: Учеб. пособие для студентов физ.-мат. фак. пед. ин-тов / Ю.И. Кравцов, А.Н. Мансуров, Н.Г. Птицина и др.; Под ред. Е.М. Гершензона, Н.Н. Малова. – М.: Просвещение, 1985. – 351 с.
23. Лавриненко В. Измеритель RCL на микросхемах// Радио.–1993.-№ 8.- С. 20-22.
24. Лосев А.К. Теория линейных электрических цепей: Учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 1987. – 512 с.
25. Ляшко М.Н. Радиотехника: Лаб. практикум. - Мн.: Выш. школа, 1981. - 269 с.
26. Магазин сопротивлений измерительный Р33. Техническое описание и инструкция по эксплуатации.
27. Малинин В.Н. Высококачественное воспроизведение звука. - М.: Знание, 1969. - 64 с.

28. Манаев Е.И. Основы радиоэлектроники: Учеб. пособие для вузов. - М.: Радио и связь, 1985. - 488 с.
29. Милливольтметр ВЗ-38А. Паспорт.
30. Найденов А.И., Новопольский В.А. Электронно-лучевые осциллографы. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 232 с.
31. Нефедов А., Головина В. Микросхемы КР142ЕН12 // Радио. – 1993. - №8. - С. 41, 42.
32. Нечаев И. Защита малогабаритных сетевых блоков питания от перегрузок // Радио. – 1996. - № 12. - С. 46, 47.
33. Нечаев И. Комбинированные усилители ТВ сигналов // Радио. – 1997. - №10. - С. 12, 13.
34. Нечаев И. Корректирующий антенный усилитель// Радио.-1994.- № 12.- С. 8.
35. Нечаев И. Регенерация "часовых" гальванических элементов // Радио. – 1998. - № 10. - С. 69
36. Нечаев И. Телевизионный антенный усилитель// Радио.– 1994.- № 6.- С. 38.
37. Нечаев И. Широкополосный антенный усилитель // Радио. - 1994. - № 11. - С. 8.
38. Николаев Ю. Самодельный блок питания? Нет ничего проще // Радио. – 1992. - №4. - С.53, 54.
39. Николаев Ю. Трансформатор – своими руками// Радио.– 1993. - № 6.- С. 28, 29.
40. Осциллограф малогабаритный любительский ОМЛ-3М. Руководство по эксплуатации.
41. Охрана труда в радио- и электронной промышленности: Учебник для техникумов/ С.П. Павлов, Л.С. Виноградов, Н.Ф. Крылова и др.; Под ред. С.П. Павлова. - М.: Радио и связь, 1985. - 200 с.
42. Пахомов А. Экономичный импульсный стабилизатор напряжения // Радио. - №9. - 1999. – С. 40, 43.
43. Пахомов А. Антенные усилители SWA // Радио. – 1999. - № 1. - С.10-12.
44. Пахомов Ю. Основные параметры усилителя НЧ и их измерение // Радио. - № 4. - 1974. - С. 51 - 54.
45. Погарский В. "Реанимация" гальванических элементов // Радио. – 1993. - № 8. - С. 36-38.
46. Поляков В. Теория: понемногу – обо всем // Радио. – 2000.- № 11.- С. 53-55.
47. Поляков В.Т. Посвящение в радиоэлектронику. - М.: Радио и связь, 1988. - 352 с.
48. Потачин И. Приставка-измеритель LC к цифровому вольтметру // Радио. – 1998. - № 12. - С. 31.
49. Прибор комбинированный цифровой Щ4313. Паспорт.
50. Резников З.М. Прикладная физика: Учеб. пособие для учащихся по факультатив. курсу: 10 кл. - М.: Просвещение, 1989. - 239 с.

51. Садовсков Б. Оценка стальных магнитопроводов // Радио. - 1998. - №12. - С.48-49.
52. Сергеев Б. Динистор // Радио. - 1993. - № 8. - С. 24.
53. Сергеев Б. Светодиод // Радио. - 1993. - № 6. - С. 24, 25.
54. Серебров Н. Омметр с линейной шкалой // Радио. - 1998. - № 3. - С. 38.
55. Соболевский А.Г. Измерения при настройке радиоаппаратуры. - М.: Энергия, 1980. - 144 с.
56. Степанов А. Простой LC-метр // Радио. - 1982. - № 3. - С. 47-48.
57. Таев И.С. Электрические аппараты автоматики и управления. Учеб. пособие для втузов. М.: Высш. школа, 1975. - 224 с.
58. Терещук Р.М., Терещук К.М., Седов С.А. Полупроводниковые приемно-усилительные устройства. Справочник радиолюбителя. - Киев: Наукова думка, 1981. - 672 с.
59. Тужилин С. Усилитель ДМВ из широкополосного// Радио.- 1997.- № 7.- С. 15.
60. Туманов Б.В. Первая помощь при поражении электрическим током. М.: Энергия, 1967. - 20 с.
61. Туркин Н. Широкополосный антенный усилитель ТВ сигналов // Радио. - 2000. - № 4. - С. 13.
62. Устройство защитного отключения УЗОШ 10.2.010 УХЛ 4. Паспорт.
63. Устройство защитного отключения УЗО.10.2.010.11.УХЛ2. Руководство по эксплуатации.
64. Хромой Б.П., Моисеев Ю.Г. Электрорадиоизмерения: Учебник для техникумов. - М.: Радио и связь, 1985. - 288 с.
65. Цветовая маркировка постоянных резисторов // Радио. - №9. - 1986. - С. 59.
66. Цыкин Г.С. Усилители электрических сигналов. - М.: Энергия, 1969. - 384 с.
67. Щербина А., Благий С. Микросхемные стабилизаторы серий 142, К142, КР142 // Радио. - 1990. - № 10. - С. 89, 90.
68. Электрические измерения. Учебник для вузов. Изд. 4-е. Под ред. А.В. Фремке. Л.: Энергия, 1973. - 424 с.
69. Электрические измерения: Учеб. пособие для вузов / В.Н. Малиновский, Р.М. Демидова-Панферова, Ю.Н. Евланов и др.; Под ред. д-ра техн. наук В.Н. Малиновского. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 416 с.
70. Электрические измерения: Учебник для вузов / Байда Л.И., Добротворский Н.С., Душин Е.М. и др.; Под ред. А.В. Фремке и Е.М. Душина. - 5-е изд., перераб. и доп. - Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1980. - 392 с.

Иноземцев Василий Алексеевич  
Иноземцева Светлана Васильевна

## Введение в электронику

Редактор Лозинский В.П.

Издательство Брянского государственного педагогического  
университета имени академика И.Г. Петровского  
241036, Брянск, ул. Бежицкая, 14

ЛР № 0200070 от 25.04.97

Подписано в печать 16.04.01. Формат 60 x 84 1/16. Усл. п.л. 9,4  
Тираж 300 экз. Печать офсетная. Заказ № 210

Отпечатано в подразделении оперативной полиграфии  
Брянского госпедуниверситета