



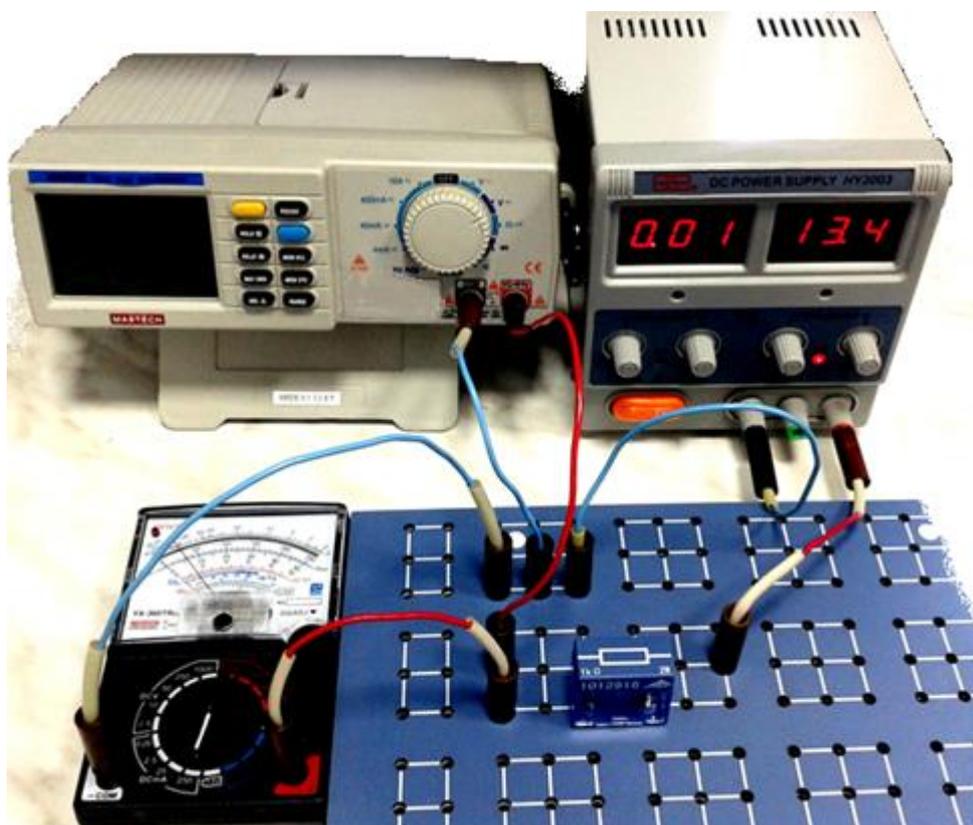
**Физический факультет МГУ
КАФЕДРА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ**

**ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ
для школьников**

Ананьева Н.Г., Самойлов В.Н., Салецкий А.М.

Лабораторная работа 3

**ИЗМЕРЕНИЯ СИЛЫ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ В ЦЕПЯХ
ПОСТОЯННОГО ТОКА**



Москва 2018

Лабораторная работа № 3
ИЗМЕРЕНИЯ В ЦЕПЯХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы

Освоить основные навыки работы с аналоговыми и цифровыми приборами для измерения силы постоянного тока и напряжения: научиться подготавливать приборы к работе, подключать их в цепь, снимать показания, оценивать погрешности.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Основные понятия и законы [1]

Электрический ток – упорядоченное движение заряженных частиц.

Электрическое напряжение между двумя точками (разность потенциалов) для безвихревого электрического поля есть отношение работы, совершаемой электрическим полем по перемещению заряда из начальной точки в конечную, к величине этого заряда.

Электродвижущая сила – отношение работы *сторонних сил* по перемещению заряда внутри источника тока к величине этого заряда. *Сторонние силы* – силы неэлектрического происхождения, направленные на разведение зарядов внутри источника тока.

Электрическая цепь – совокупность устройств, образующих путь для электрического тока. Отдельные устройства, входящие в состав электрической цепи, называют *элементами цепи*. Элементами электрических цепей являются резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, диоды, источники тока и другие элементы, соединенные между собой проводниками.

Схема электрической цепи (принципиальная схема) – графическое изображение последовательности соединения элементов электрической цепи, с указанием их условных обозначений.

Величину, характеризующую противодействие проводящей среды движению электрических зарядов, т.е. току, называют **электрическим сопротивлением R** . Элемент электрической цепи, основным параметром которого является его электрическое сопротивление R , называют резистором.

Сопротивление проводника

$$R = \rho \frac{L}{S}, \quad (1)$$

где L – длина проводника, S – площадь поперечного сечения, ρ – удельное сопротивление (оно зависит от свойств материала и температуры, влажности, давления, освещенности и т.д.).

Электрические цепи можно классифицировать по нескольким признакам.

- По виду тока различают цепи *постоянного* (не изменяющегося во времени) *и переменного тока*.
- По характеру параметров элементов цепи разделяют на *линейные и нелинейные*. К линейным относят цепи, в которых электрическое сопро-

тивление каждого участка не зависит от величины и направления тока и напряжения. В линейной цепи могут быть резисторы, катушки индуктивности (без сердечников), и некоторые другие элементы.

- Цепи бывают *простые и сложные*. К простым относят цепи, все элементы которых соединены последовательно. Через все элементы такой цепи протекает один и тот же ток. К сложным цепям относят цепи с разветвлениями. Различают разветвленные цепи с одним источником тока и с несколькими источниками.

Ветвь электрической цепи – участок цепи, элементы которого соединены последовательно.

Узел электрической цепи – точка соединения не менее чем 3-х ветвей.

Замкнутый контур – любой путь вдоль ветвей электрической цепи, начинающийся и заканчивающийся в одной и той же точке.



Участки электрической цепи делятся на пассивные и активные. Участок электрической цепи, содержащий источник электрической энергии, называется активным, не содержащий – пассивным.

У реального источника энергии напряжение на выходе зависит от протекающего через него тока. В расчетах часто можно ограничиться моделью источника энергии с двумя постоянными параметрами: ЭДС E и внутренним сопротивлением R_0 (оно может быть показано отдельным элементом). Если источник не подключен к внешней цепи, то напряжение на его выводах равно ЭДС (напряжение холостого хода). Напряжение U на выводах нагруженного источника меньше ЭДС и равно

$$U = E - R_0 I. \quad (2)$$

Источник ЭДС, внутренним сопротивлением которого можно пренебречь, называется идеальным.

Идеальный источник напряжения (источник ЭДС) – источник энергии, напряжение на клеммах которого не зависит от протекающего тока.

Идеальный источник тока – источник энергии, ток которого при любом напряжении на его выводах остается неизменным.

Закон Ома. Напряжение U между концами проводника равно произведению силы тока I , протекающего по проводнику, и его сопротивления R :

$$U = I R. \quad (3)$$

Правила Кирхгофа. В электротехнике эти правила называют законами, что не вполне корректно, так как правила Кирхгофа являются следствием других, более общих фундаментальных законов физики и могут быть выведены из них.

Первое правило Кирхгофа является следствием закона сохранения заряда, согласно которому в узлах электрической цепи не может происходить накопление зарядов. Следовательно, сумма токов, входящих в узел, равна

сумме токов, выходящих из узла, т.е. алгебраическая сумма токов ветвей в любом узле электрической цепи равна нулю:

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0 \quad (4)$$

Второе правило Кирхгофа является следствием закона сохранения энергии. По второму правилу Кирхгофа, алгебраическая сумма падений напряжений в контуре равна алгебраической сумме ЭДС в этом контуре:

$$\sum_{k=1}^n E_k = \sum_{k=1}^m I_k R_k. \quad (5)$$

Вольтамперная характеристика

(ВАХ) элемента – это зависимость тока от напряжения или напряжения от тока для данного элемента. ВАХ является основной характеристикой нелинейного элемента, необходимой для описания его работы в электрических цепях.

Резистор является линейным элементом и его вольтамперная характеристика – прямая линия, угол наклона которой зависит от сопротивления резистора (рис. 1).

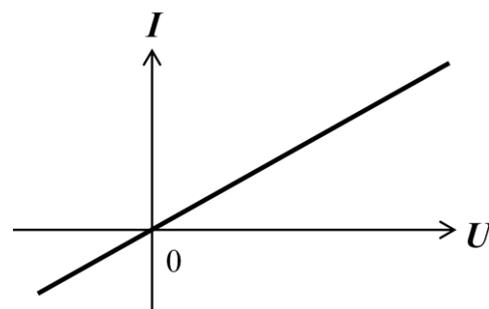


Рис. 1. Вольтамперная характеристика резистора.

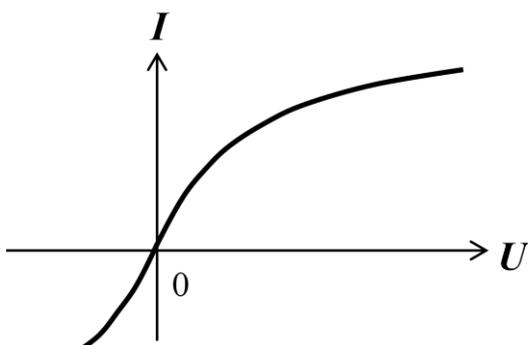


Рис. 2. Вольтамперная характеристика лампы накаливания.

У нелинейных элементов сопротивление не является постоянной величиной. Вольтамперная характеристика таких элементов нелинейная. Примерами нелинейных элементов являются лампы накаливания, полупроводники и др. Рассмотрим ВАХ некоторых нелинейных элементов.

Основным элементом **ламп накаливания** является вольфрамовая нить. При пропускании через неё тока, нить раскаляется до высоких температур, излучая свет. При этом сопротивление линейно возрастает с повышением температуры. Поэтому ВАХ лампы накаливания оказывается нелинейной (рис. 2).

Другим нелинейным элементом является **полупроводниковый диод**, который выполнен на основе полупроводникового кристалла и обладает различной проводимостью в зависимости от полярности приложенного к нему напряжения. Типичная ВАХ полупроводникового элемента с одним p-n переходом представлена на рис. 3.

Полупроводниковые выпрямительные диоды работают на прямой и обратной ветвях ВАХ до пробоя: пропускают ток только в одном направлении. Пробой вызывает необратимые разрушения.

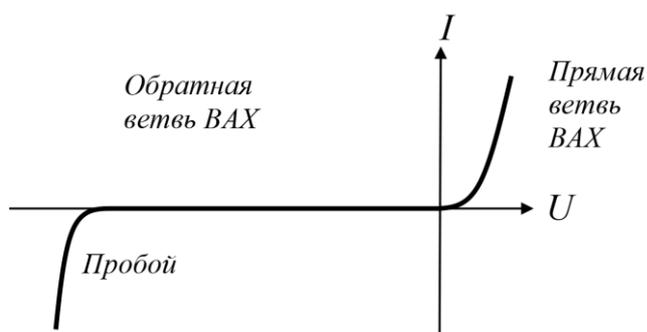


Рис. 3. Вольтамперная характеристика диода.

В отличие от выпрямительного диода, стабилитрон работает на обеих ветвях – и в режиме электрического пробоя (если ток через него не превышает допустимых значений). На участке пробоя сравнительно небольшому изменению напряжения соответствует значительное изменение силы тока. Основное его назначение – стабилизация напряжения.

Светодиоды (диоды, излучающие свет) работают в прямом режиме. При работе светодиода (как и любого диода) в обратном режиме следует следить за тем, чтобы напряжение на нём не превышало напряжение пробоя. Напряжения пробоя у светодиодов небольшие (единицы Вольт), поэтому рекомендуется предусматривать схемотехнические решения для защиты светодиода от пробоя, например, шунтировать (параллельно) светодиод обычным диодом (или другим светодиодом, см. рис. 13), включенным в обратном направлении. Из-за резкой нелинейности "прямой ветви", светодиод подключают к источнику питания через резистор, иначе при незначительном изменении напряжения будет значительное изменение тока на светодиоде и может быть превышен максимально допустимый для светодиода ток.

На рис. 4 представлены вольтамперные характеристики светодиодов, изготовленных из разных полупроводниковых материалов (более подробно см., например, [2]). Из рисунка видно, что при прямом включении ток в светодиодах начинает течь (светодиод начинает светиться) при больших напряжениях, чем в диодах.

Различие прямых ветвей вольтамперных характеристик светодиодов из разных материалов связано с различной шириной запрещенной зоны. Чем меньше длина волны излучения, тем больше прямое падение напряжения на диоде и потери электрической энергии в нем. Обратные ветви вольтамперных характеристик соответствуют относительно малым пробивным напряжениям, что объясняется малой толщиной $p-n$ переходов.

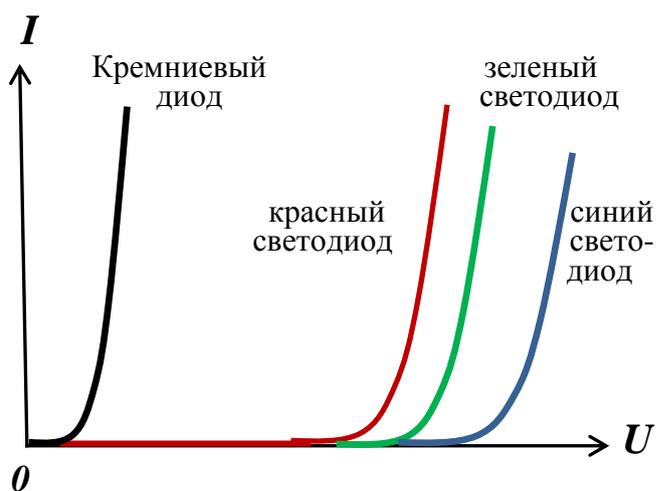


Рис. 4. ВАХ кремневого диода и светодиодов.

Измерение силы тока и напряжения. Общие сведения

Приборы бывают *аналоговые* (чаще со стрелочными индикаторами) и *цифровые* (обычно с цифровыми индикаторами). С цифровых индикаторов

проще считывать показания, но, когда необходимо следить за несколькими измеряемыми величинами и не требуется высокая точность измерений, используют стрелочные индикаторы. Например, в современных автомобилях на приборной панели есть и стрелочные, и цифровые индикаторы.

Универсальные приборы позволяют выполнять измерения в цепях и постоянного, и переменного тока. *Комбинированные приборы (мультиметры)* предназначены для измерения различных электрических величин (например, U , I , R или др.).

При измерении характеристик постоянного тока универсальными и комбинированными приборами переключатель рода работы следует установить в положение **DC (Direct Current)** или "-" (и далее символ измеряемой величины). Отсчет показаний при этом производится по той шкале, против которой указаны символы "-" или "DC" (и символ измеряемой величины). Цена делений определяется для каждого предела измерений или для каждой шкалы в отдельности.

Во избежание выхода прибора из строя необходимо следить за полярностью его подключения в цепь. Входную клемму прибора, обозначаемую символами "*", "-" или "общ", "com", подключают к той точке разрыва цепи, которая имеет меньший потенциал относительно другой точки, подключаемой к входной клемме, обозначаемой символами "+" или "A" или "V". Для того, чтобы облегчить сборку и проверку схемы, удобно пользоваться цветными проводами: красные провода подключать к «+» источника питания и клеммам прибора, отмеченными знаком «+», а синие – к «-».

В силу конструктивных особенностей и способов преобразования исследуемой величины в показания прибора, при выполнении измерений, а также перед их началом, необходимо периодически *проверять правильность установки нулевого значения* по шкале или цифровому индикатору. Для этого необходимо *замкнуть накоротко входные клеммы прибора*. В случае, если показания отличны от «0» – обратиться к преподавателю или дежурному инженеру.

Для измерения силы тока применяют приборы, называемые *амперметрами*. В основе работы стрелочных амперметров лежит однозначная зависимость угла поворота стрелки индикатора, соединенной с подвижным узлом, от величины силы тока, протекающего через измерительный узел прибора (см., например, [3]).

Амперметры включают последовательно, в разрыв цепи, на том ее участке, где необходимо определить силу тока (рис. 5). Шкалы амперметров обычно градуируют непосредственно в единицах силы тока: амперах (A или mA, μ A).

Чем меньше внутреннее сопротивление амперметра, тем меньше оно влияет на ток в цепи. Поэтому для корректных измерений силы тока амперметром должно выполняться условие: $r_A \ll R$, где r_A – внутреннее сопротивление

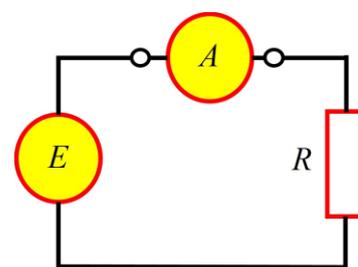


Рис. 5. Подключение амперметра A в исследуемую цепь; E – ЭДС, R – сопротивление цепи.

ление прибора, R – сопротивление исследуемой цепи. Для расширения пределов измерений амперметра параллельно ему подключают резисторы, которые называют **шунтами** (их сопротивление меньше внутреннего сопротивления прибора). Сопротивление шунта определяется из соотношения

$$r_{\text{ш}} = \frac{r_A}{n-1}, \quad (6)$$

где n – число, показывающее, во сколько раз увеличен предел измерения, $r_{\text{ш}}$ – величина сопротивления шунта. Внутри корпуса *многопредельных амперметров* размещают несколько различных шунтов. На лицевой панели указывают максимальные значения силы тока, которые могут быть измерены при выбранном положении переключателя пределов измерений. Часто многопредельные приборы имеют несколько шкал, которые соответствуют определенному пределу измерений. Если у прибора имеется единственная шкала, цена деления шкалы будет разной для каждого предела измерений.

Амперметр – это прибор, который подвергается повышенной опасности при работе:

1. Через амперметр протекает весь ток, который течет в цепи (так как его подключают последовательно), поэтому измерения силы тока желательно проводить, когда приблизительно известно ожидаемое значение (хотя бы по порядку величины). Если оно не известно, то ***измерения следует начинать, используя максимальный предел***, так как в этом случае вероятность превышения максимально допустимого значения силы тока в цепи для данного прибора (а следовательно, и выхода его из строя) будет наименьшей. Если при этом стрелка отклонится на малый угол, то необходимо считать показания с амперметра, и, если они меньше, чем предел меньшего диапазона измерения, то надо перейти на меньший предел, предварительно отключив прибор из цепи.
2. Сопротивление амперметра должно быть достаточно маленьким, чтобы как можно меньше исказить ток в цепи. Поэтому, если подключить амперметр неправильно (например, параллельно элементу с большим сопротивлением или непосредственно к источнику питания), ток через амперметр быстрее всего превысит допустимые значения и прибор выйдет из строя.

Для измерения напряжения на участке цепи (разности потенциалов между крайними точками), применяют приборы – **вольтметры**, которые подключают параллельно исследуемому участку (рис. 6). Фактически аналоговый вольтметр (кроме приборов некоторых систем, например, электростатической) представляет собой амперметр, к которому последовательно включен добавочный резистор с достаточно большим сопротивлением, шкала которого

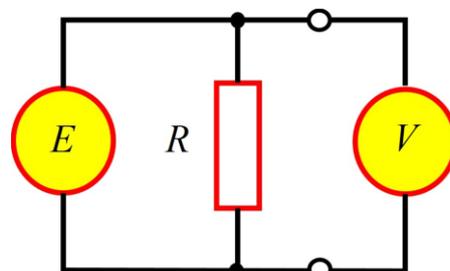


Рис. 6. Подключение вольтметра V в исследуемую цепь; E – ЭДС, R – сопротивление, на котором измеряется напряжение.

проградуирована в единицах напряжения – вольтах (В, или мВ, мкВ, кВ). В отличие от амперметров, внутреннее сопротивление вольтметра r_v должно быть как можно больше сопротивления того участка цепи R , на котором проводятся измерения. В противном случае параллельное подключение прибора приведет к существенному изменению величины силы тока в цепи и, как следствие, к заметному изменению измеряемой разности потенциалов.

Для расширения пределов измерений вольтметра последовательно с ним включают добавочные сопротивления r_d , величина которых может быть определена из соотношения

$$r_d = (n - 1)r_v, \quad (7)$$

где n – число, определяющее во сколько раз требуется увеличить предел измерений.

Большой точности измерения напряжения можно достичь, если воспользоваться цифровыми вольтметрами. Их внутреннее сопротивление, как правило, значительно превышает внутреннее сопротивление аналоговых вольтметров.

При одновременном измерении силы тока и напряжения в цепи возможны два варианта подключения приборов, представленные на рис.7. Вариантом (а) можно пользоваться, когда внутреннее сопротивление вольтметра r_v значительно превышает сопротивление участка цепи R , а вторым (б) – когда внутреннее сопротивление амперметра r_A значительно меньше величины R (объясните – почему?).

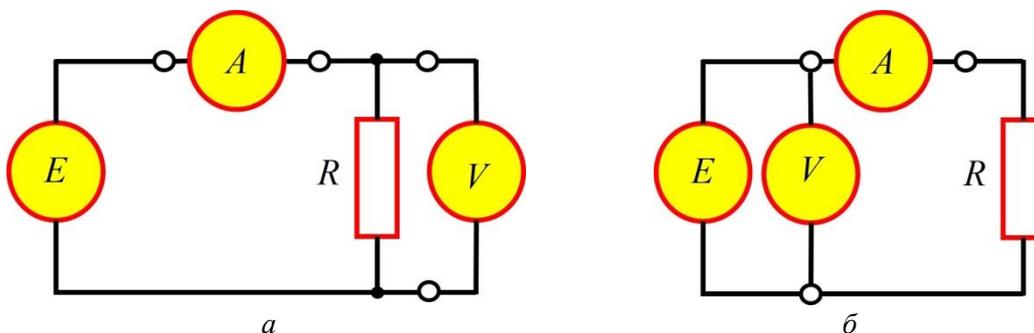


Рис. 7. Два варианта схем включения приборов при одновременном измерении силы тока и напряжения.

Для измерения сопротивления участка цепи необходимо измерить силу тока через него и напряжение на его концах. Если подключить этот участок цепи к идеальному источнику напряжения с известным ЭДС, то по показаниям амперметра можно определить сопротивление, и проградуировать амперметр непосредственно в Омах (шкала такого прибора будет неравномерной). Пример простейшего омметра приведен на рис. 8.

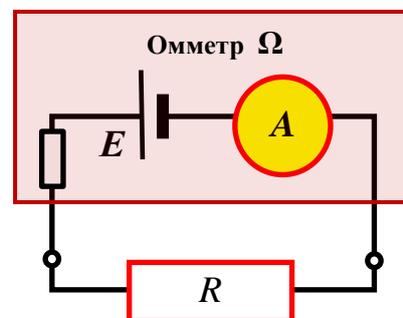


Рис. 8. Простейший омметр последовательного включения.

Омметр имеет собственный источник питания, поэтому его **нельзя включать в цепь, по которой течет ток.**

Приборные погрешности

В зависимости от принципа действия прибора погрешности измерения могут рассчитываться:

- от измеренного значения (в некоторых стрелочных приборах);
- от предела (диапазона) измерения (в большинстве стрелочных приборов);
- от предела измерения и от измеренного значения (в большинстве цифровых приборов).

Какой именно метод расчета погрешности измерения надо использовать в случае конкретного прибора (по какой формуле рассчитать погрешность), написано в паспорте прибора.

- **Приборные погрешности обусловлены**, во-первых, разными условиями проведения измерений (температура, влажность, и т.д.) – в инструкции к прибору указывают необходимые условия – их надо соблюдать.
- Во-вторых, невозможно абсолютно точно считать результат измерения. В аналоговых приборах стрелка, как правило, точно не совпадает с масштабными рисками или риски на линейке не совпадают точно с измеряемым объектом. В цифровых приборах ограничено количество считываемых цифр. **Погрешность считывания в аналоговых приборах обычно оценивают как $\sigma \approx \omega/\sqrt{12}$** , где ω – цена наименьшего деления шкалы в окрестности точки измерения. В цифровых приборах погрешность считывания, как правило, учитывают в приведенной в паспорте формуле для расчета погрешности.
- Приборные погрешности возникают и из-за разброса параметров деталей в приборах при промышленном производстве. Только точные дорогие приборы собирают и проверяют индивидуально. Когда на заводе выпускают партию приборов, то по выборке из этой партии всем приборам присваивают некоторую погрешность измерения. В этой партии будут попадаться приборы и более точные, и более грубые (см. рис. 9). Причем основную погрешность будет вносить систематическая составляющая (именно из-за разброса параметров деталей). В паспорте прибора приводят формулы для расчета **предельных** погрешностей (результат каждого измерения почти со 100% вероятностью будет находиться в интервале *результат \pm погрешность*). Считаем, что предельная погрешность связана со среднеквадратичной погрешностью формулой $\sigma \approx \Delta_{\text{пред}}/3$.

Погрешности при измерениях стрелочными приборами

Погрешность считывания: $\sigma_{\text{счит}} = \omega/\sqrt{12}$, где ω – цена наименьшего деления шкалы в окрестности точки измерения.

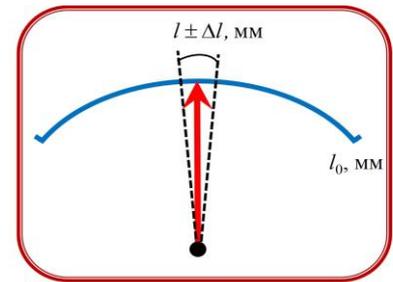


Рис. 9. Показания амперметров, соединенных последовательно (т.е. измеряющих один и тот же ток).

Приборная погрешность для большинства стрелочных приборов зависит только от диапазона измерения и указывается в паспорте как $k\%$ от диапазона измерения l_0 :

$$\Delta l = \frac{k}{100} l_0, \quad (8)$$

где Δl – предельная приборная погрешность, l_0 – диапазон измерения.



Суммарные погрешности

Источники неопределенности измерений могут быть разными: это и сама измеряемая величина, и измерительные приборы, погрешность считывания показаний с приборов и т.д. Как правило, все они независимы. В этом случае общая погрешность (стандартное отклонение) равна квадратному корню из суммы квадратов стандартных отклонений отдельных погрешностей (например, для погрешностей случайных, приборных, считывания по шкалам, округления и т.д.)

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{\text{случ}}^2 + \sigma_{\text{прибор}}^2 + \sigma_{\text{счит}}^2 + \sigma_{\text{окр}}^2 + \dots} \quad (9)$$

На практике, если какие-то из погрешностей меньше других на порядок (т.е. в 10 раз) или более, то ими можно пренебречь.

Случайная погрешность стремится к «0» при увеличении числа измерений. Приборная погрешность от количества измерений не зависит. Чтобы уменьшить суммарную погрешность имеет смысл провести столько измерений, чтобы $S_{\text{случ}}$ была примерно в 10 раз меньше $\sigma_{\text{прибор}}$ (иногда достаточно в 3-4 раза).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

При проведении данной лабораторной работы используются следующие приборы и оборудование:



Блок питания (БП),
например, DC POWER SUPPLY HY3002

Выходное напряжение, В	0 – 30
Точность установки выходного напряжения, В	0,1
Выходной ток, А	0 – 3
Точность установки выходного тока, А	0,01

Для регулировки силы тока и напряжения отведено по два регулятора: ГРУБО (COARSE) и ТОЧНО (FINE). Выходные значения тока и напряжения контролируются на 3-разрядных индикаторах.

Цифровой мультиметр (примеры)

M9803R



MS8040



Приборные погрешности при измерении постоянного напряжения.

X – измеренная величина, D – разрешение (единица последнего разряда).

мультиметр M9803R	
Диапазон	Точность, мВ
400 мВ	$\pm(0.3\% X + 0,5)$
4 В	$\pm(0.3\% X + 2)$
40 В	$\pm(0.3\% X + 20)$

мультиметр MS8040		
Диапазон	Разрешение D	Точность
200 мВ	0,01 мВ	$\pm(0.05\% X + 6 D)$
2 В	0,1 мВ	$\pm(0.05\% X + 6 D)$
20 В	1 мВ	$\pm(0.05\% X + 6 D)$

Приборные погрешности при измерении сопротивления.

мультиметр M9803R		
Диапазон	D, Ом	Точность, мВ
400 Ом	0,1	$\pm(0.5\% X + 5D)$
4 кОм	1	$\pm(0.5\% X + 3D)$
40 кОм	10	$\pm(0.5\% X + 3D)$
400 кОм	100	$\pm(0.5\% X + 3D)$

мультиметр MS8040		
Диапазон	D, Ом	Точность
200 Ом	0,1	$\pm(0.1\% X + 10D)$
2 кОм	1	$\pm(0.1\% X + 10D)$
20 кОм	10	$\pm(0.1\% X + 5D)$
200 кОм	100	$\pm(0.1\% X + 5D)$

Мультиметр стрелочный (примеры)



YX – 360TRes



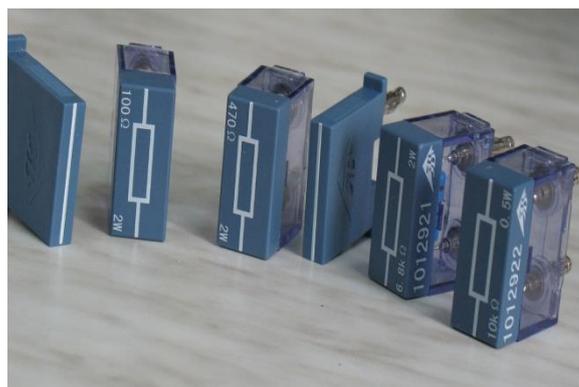
MASTECH M1015B



MULTMETR 8801

Плата с гнездами для установки элементов схем (3В)

Гнезда платы, соединенные белыми линиями, внутри нее замкнуты проводниками накоротко



Набор элементов (резисторы, диоды, перемычки)

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Запишите в тетрадь приборы, находящиеся на Вашем рабочем месте:

Блок питания

Мультиметр цифровой

Мультиметр стрелочный

Упражнение 1. Подготовка приборов к работе, определение внутреннего сопротивления амперметра.

Рассчитайте силу тока в цепи рис. 10, если сопротивление амперметра $R_A \ll R$ ($R = 1 \text{ КОм}$), а напряжение на блоке питания 30 В. Запишите в табл.1.

1. Подготовьте приборы к работе:

- Перед включением блока питания (БП) проверьте ручки регулировки напряжения и силы тока: обе ручки регулировки напряжения «VOLT-AGE» («FINE» – плавно, «COARSE» – грубо) надо повернуть против часовой стрелки до упора («на 0»). Ручку «COARSE» регулировки силы тока «CURRENT» поверните по часовой стрелке на $60 - 90^\circ$ от «0». Включите блок питания – нажмите кнопку «POWER».

Приборы, которые работают от сети, как правило, должны прогреваться 5 – 15 минут для того, чтобы стабильно работать. Поэтому БП (и цифровой мультиметр) не надо выключать после каждого упражнения. Надо уменьшить напряжение на БП до «0», вынуть штекера из клемм прибора.

- **В данной работе стрелочный мультиметр надо использовать как амперметр постоянного тока – в режиме работы DCmA.** Поставьте поворотный переключатель мультиметра в режим работы DCmA, с максимальным пределом измерения (например, 250 мА). Проверьте положение стрелки прибора – она должна стоять на «0». Если стрелка стоит не на «0», обратитесь к преподавателю для установки «0». Определите шкалу, по которой надо будет считывать показания прибора – рядом с этой шкалой должно стоять обозначение «DCmA» или «—». Определите цену деления шкалы амперметра на других диапазонах (например, 25 мА и 2,5 мА, или 10 мА), запишите в табл. 1.
- **Мультиметр цифровой в данной работе надо использовать в режиме работы измерения постоянного напряжения «V—».** Включите мультиметр поворотным переключателем, выставив режим «V—». Замокните проводником клеммы «COM» и «VΩ...», на индикаторе мультиметра должны быть нули.

2. Для определения внутреннего сопротивления амперметра соберите схему с рис. 10 (блок-схема – на рис. 11). Для сборки схем используйте электронный конструктор 3В (гнезда платы, соединенные белыми линиями, соединены накоротко). Сопротивление резистора – 1 кОм. В качестве амперметра используйте стрелочный мультиметр в режиме измерения постоянного тока (начальный предел измерения – максимальный). В качестве вольтметра используйте цифровой мультиметр в режим измерения постоянного напряжения (диапазоны измерения в этом приборе устанавливаются автоматически). При подключении приборов в цепь необходимо соблюдать полярность их подключения относительно блока питания. Для того, чтобы облегчить сборку и проверку схемы, используйте цветные провода: красные провода подключайте к «+» прибора, синие – к «—».

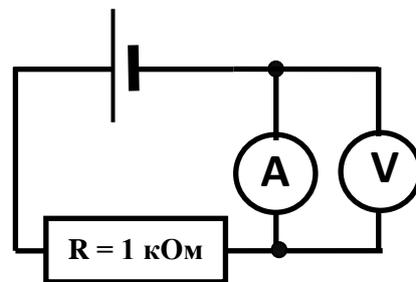


Рис. 10. Схема для определения внутреннего сопротивления амперметра.

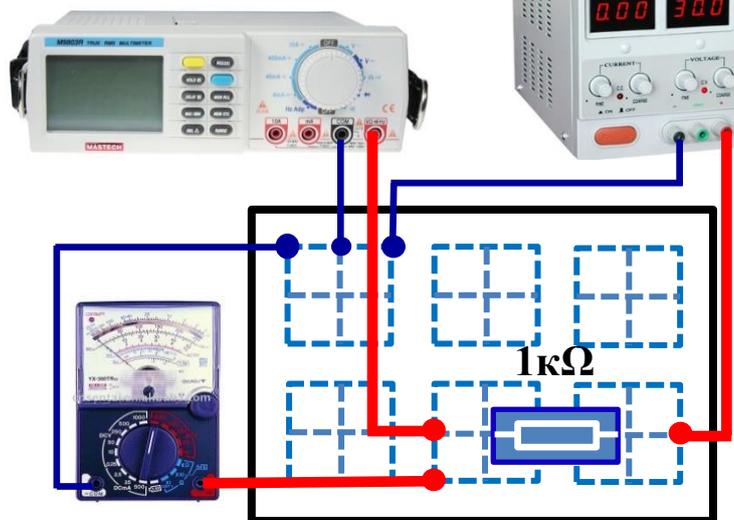
При подключении приборов в цепь необходимо соблюдать полярность их подключения относительно блока питания. Для того, чтобы облегчить сборку и проверку схемы, используйте цветные провода: красные провода подключайте к «+» прибора, синие – к «—».

Прежде, чем подключать блок питания, преподаватель должен проверить Вашу схему.

3. Установите на БП напряжение 30 В, используйте обе ручки регулировки: грубо и точно. Измерьте напряжение на клеммах амперметра и силу тока через амперметр. Сравните показания амперметра с расчетными: если они будут отличаться более, чем на 10-20 %, пригласите преподавателя для проверки работы амперметра. Результаты измерений занесите в табл. 1.

Вольтметр –
цифровой мультиметр

Блок питания (БП)



Амперметр –
стрелочный
мультиметр

Учебная плата

Рис. 11. Блок-схема для определения внутреннего сопротивления амперметра.

4. Уменьшите напряжение на БП до «0».

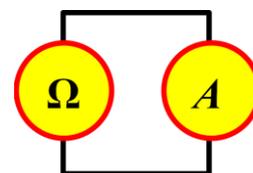
5. Определите напряжение на БП для других диапазонов измерения амперметра как: $U_{\text{пит}}(\text{В}) \approx I_{\text{диап. изм.}} * R / 2 = I_{\text{диап. изм.}}(\text{А}) * 500$, запишите в табл. 1.

6. Поставьте меньший (после максимального) диапазон измерения силы тока. Установите на БП напряжение, рассчитанное в п.5. Измерьте напряжение на клеммах амперметра и силу тока через амперметр, результаты занесите в табл. 1.

7. Уменьшите напряжение на БП до «0». Аналогично пп. 5, 6 измерьте напряжение на клеммах амперметра и силу тока через амперметр на других диапазонах измерений, результаты занесите в табл. 1.

8. Уменьшите напряжение на БП до «0». Поставьте диапазон измерения силы тока максимальный. Разберите схему.

9. Измерьте сопротивление амперметра на каждом диапазоне. Для этого цифровой мультиметр переключите в режим измерения сопротивления и соедините его с амперметром (стрелочным мультиметром). Результаты измерений запишите в табл. 2.



Разберите схему, цифровой мультиметр переключите в режим «V→».

Таблица 1. Сила тока через амперметр и напряжение U_a на клеммах амперметра

$U_{\text{пит}}, \text{В}$	Расчет $I, \text{мА}$	Диапазон измерения $I, \text{мА}$	Цена деления $I, \text{мА}$	$I, \text{мА}$	$\sigma_I, \text{мА}$	$U_a, \text{мВ}$	$\sigma_U, \text{В}$	$R_a, \text{Ом}$	$\sigma_R, \text{Ом}$
30		250							
10		25							
1		2,5							

Таблица 2. Измерение внутреннего сопротивления амперметра

Диапазон измерения I , мА	R_a , Ом	σ_R , Ом
250		
25		
2,5		

Обработка результатов

1. Вычислите погрешность измерения тока стрелочным мультиметром, учитывая приборную погрешность и погрешность считывания:

$$\sigma_I = \sqrt{\left(\frac{\Delta I}{3}\right)^2 + \left(\frac{\omega}{\sqrt{12}}\right)^2}, \quad (10)$$

ΔI – предельная приборная погрешность (5% от диапазона измерения),
 ω – цена деления на данном диапазоне измерения.

Результаты запишите в табл. 1.

2. Вычислите погрешность измерения напряжения цифровым мультиметром, используемым в работе, σ_U по табл. со стр. 10.
3. Рассчитайте внутреннее сопротивление амперметра R_a на каждом диапазоне (оцените погрешность), запишите в табл. 1.
4. Оцените погрешность измерения внутреннего сопротивления амперметра цифровым омметром (используйте табл. со стр. 10), запишите в табл. 2. Сравните значения измеренных сопротивлений с рассчитанными в п. 3.

Упражнение 2. Определение удельного сопротивления константанового провода.

Рассчитайте силу тока в цепи рис. 11, если сопротивление константанового провода $R_{\text{пров}} \ll R$ ($R = 470$ Ом), а напряжение на блоке питания 30 В.

Измерения

1. Соберите электрическую схему, в соответствие с рис. 12, константановый провод возьмите по указанию преподавателя. $R = 470$ Ом. Проверьте, что диапазон измерения амперметра максимальный, цифровой мультиметр работает в режиме «V→». **Прежде, чем подключать блок питания, преподаватель должен проверить Вашу схему.**
2. Установите напряжение на БП 30 В. Проверьте показания амперметра: они должны быть сравнимы с рассчитанным значением силы тока. Уменьшая напряжение на блоке питания (от 30 до 1 В), измерьте ток в цепи I и напряжение на константановом проводе U не менее четырех–пяти раз на каждом диапазоне измерения. Когда показания амперметра при уменьшении напряжения станут меньше, чем величина меньшего

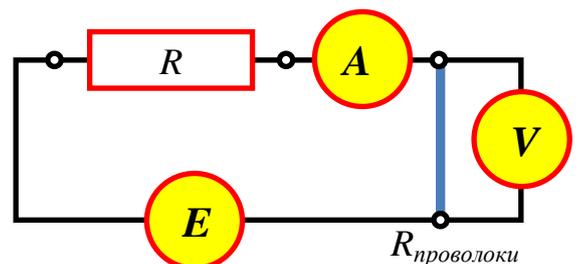


Рис. 12. Схема измерений сопротивления константановой проволоки.

Измерения

1. Соберите схему для измерения ВАХ по рис. 13, не подключая к ней блок питания. Дополнительный резистор $R = 6,8 \text{ КОм}$, включенный последовательно со светодиодами, необходим для ограничения максимального тока и подобран таким, чтобы можно было подавать на схему любое напряжение от -30 до $+30 \text{ В}$. При непосредственном подключении светодиода к источнику тока он может сгореть. Наличие такого ограничительного сопротивления, как правило, обязательно при включении в цепь любых нелинейных элементов. Поскольку ток в цепи не будет превышать 5 мА (объясните, почему?), начальный предел измерения можно установить $10\text{-}25 \text{ мА}$.
2. После того, как преподаватель проверит собранную схему, можно подключить блок питания. Под наблюдением преподавателя установите напряжение на БП $10 - 15 \text{ В}$. Проверьте, что светодиод светится. Уменьшите напряжение на БП до «0». Поменяйте полярность подключения светодиодов (для этого выньте элемент конструктора со светодиодами, поверните его на 180° и снова поставьте в схему). Установите напряжение на БП $10 - 15 \text{ В}$, проверьте, что и второй светодиод светится.
3. Меняя напряжение на БП (от 30 до 0 В), измерьте ток I и напряжение U . Чтобы уменьшить погрешность измерения силы тока стрелочным прибором, можно воспользоваться следующим методом. Изменяя напряжение на БП надо добиваться, чтобы стрелка амперметра устанавливалась напротив деления шкалы – тогда погрешностью считывания можно пренебречь и учитывать только приборную погрешность.



Рис. 13. Электрическая схема и блок-схема соединения элементов для измерения ВАХ светодиодов.

4. Напряжение питания надо регулировать, устанавливая ток в цепи от $4\text{-}5$ до 0 мА с шагом $0,1 - 1 \text{ мА}$ (шаг выбирается из условия четкого представления хода ВАХ во всех ее участках). Обязательно зафиксировать максимальное напряже-

ние, при котором ток в цепи еще не течет $I = 0$, светодиод не светится. Результаты измерений запишите в табл. 4. Запишите цвет светодиода.

- Уменьшите напряжение на блоке питания до «0». Поменяйте полярность подключения светодиодов (для этого выньте элемент конструктора со светодиодами, поверните его на 180° и снова поставьте в схему). Снимите прямую ветвь ВАХ для второго светодиода.

Таблица 4. **ВАХ светодиодов**

Цвет светодиода	№	U , В	σ_U , В	I , мА	Диап. изм. I , мА	σ_I , мА
	1					
	2					
	...					
	10					
	1					
	2					
	...					
	10					

Обработка результатов

- Определите погрешности измерений напряжения и силы тока аналогично упр. 1, запишите в табл. 4.
- Постройте на одном графике, в 1-й координатной четверти зависимости $I(U)$ для светодиодов (прямые ветви ВАХ). Отметьте на кривых цвет свечения светодиодов.

Упражнение 4. Проверка выполнения правил Кирхгофа

Нарисуйте в тетради принципиальную схему предложенной блок-схемы (рис. 14.) для одновременного измерения силы тока и напряжения на резисторе R1 (без перемычек, с вольтметром, амперметром и БП).

Измерения

- Соберите электрическую цепь, блок-схема которой представлена на рис. 14. Перемычки выставлять обязательно – вместо них надо будет подключать амперметр. Предложенные в комплекте к задаче резисторы (например, 330 Ом, 470 Ом, 1 Ком, 6,8 Ком) расположите так, чтобы при напряжении питания 10 В сила тока в любой ветви цепи не превышала 80 мА. Запишите номиналы резисторов.
- Подключите вольтметр для измерения напряжения на R1. Подключите амперметр (с максимальным пределом измерения) вместо перемычки в ветвь цепи с R1.
- Перед подключением БП пригласите преподавателя проверить собранную схему.

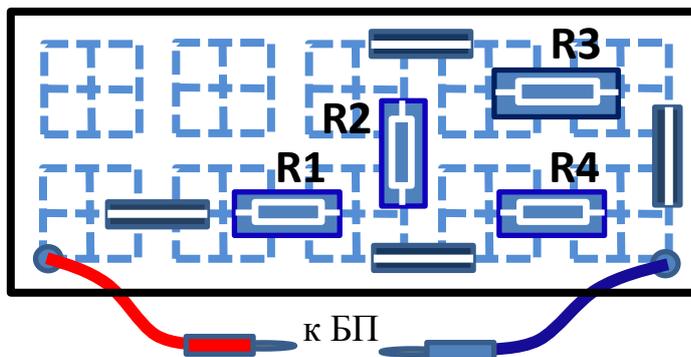


Рис. 14. Блок-схема электрической цепи для проверки правил Кирхгофа.

Подключите БП, выставьте на нем выходное напряжение 10 В (или другое, заданное преподавателем) – во время работы это напряжение менять нельзя, запишите это напряжение.

4. Измерьте U_{R1}^* , запишите в табл. 5 (U_{R1}^* измеренное одновременно с I). Измерьте силу тока. Если показания амперметра будут меньше, чем величина следующего диапазона, отсоедините блок питания (достаточно отсоединить один провод), переключите диапазон измерения амперметра, подключите блок питания снова.
5. Вместо амперметра поставьте в схему перемычку. Еще раз измерьте напряжение на $R1$ – теперь независимо измеряя напряжение, запишите U_{R1} в табл. 5, сравните с измерениями U_{R1}^* из п. 4.
6. Измерьте силу тока и напряжения на остальных резисторах, аналогично пп. 4–5.

Таблица 5. Измерения и расчёт силы тока и напряжения в разветвленной цепи. $U_{пит} = 10$ В.

№	R, Ом	I, mA расчет	I, mA	Диапазон измерения I, mA	ΔI , mA	U, В расчет	независимо		одновременно	
							U, В	ΔU , В	U^* , В	ΔU , В

Обработка результатов

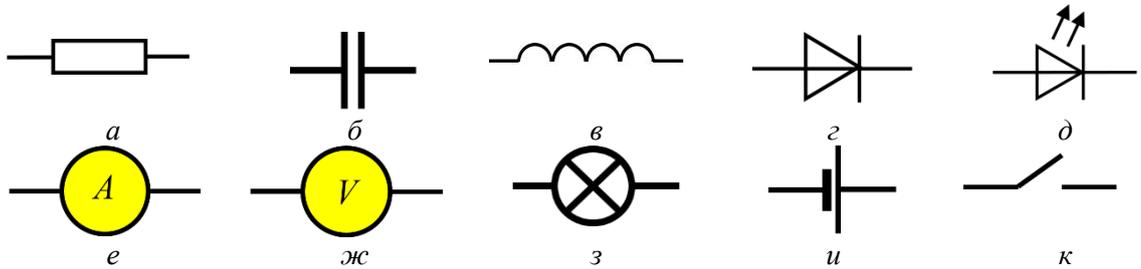
1. Определите погрешности σ_U измерений напряжения U (см. табл. стр. 10).
2. Определите погрешности σ_I измерения тока I , используя формулу (10). Результаты запишите в табл. 5.
3. Рассчитайте напряжение на каждом резисторе и силу тока через него, используя заданное значение $U_{пит}$, запишите в табл. 5.
4. Сравните независимые и одновременно измерения U_i ; рассчитанные и измеренные значения U_i и I_i . Объясните полученные результаты.
5. Запишите 1 правило Кирхгофа для каждого узла Вашей цепи; 2 правило Кирхгофа – для всех замкнутых контуров Вашей цепи. Объясните полученные результаты.

Основные итоги работы ...

Выводы ...

Контрольные вопросы

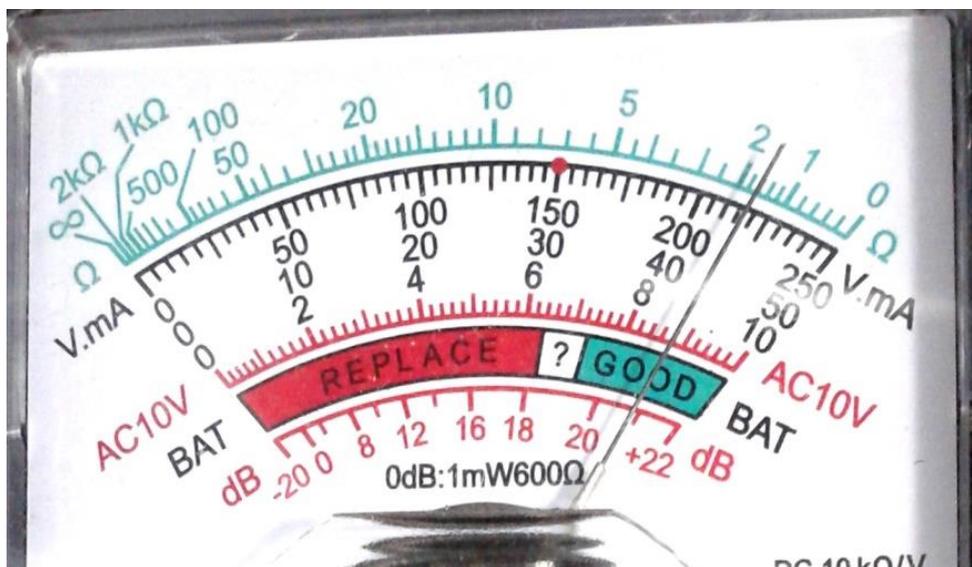
1. Сформулируйте и запишите в рабочую тетрадь основные правила работы с амперметрами.
2. Сформулируйте и запишите в рабочую тетрадь основные правила работы со светодиодами.
3. Назовите элементы электрических цепей:



4. Нарисуйте схему подключения шунта к амперметру (добавьте шунт к схеме на рис. 5). Если сопротивление амперметра 50 Ом, какой шунт надо подключить, чтобы увеличить диапазон измерений силы тока в 10 раз? Каким стало сопротивление амперметра с шунтом?
5. По какой из схем рис. 7 надо проводить измерения в упражнении 1? Почему?
6. По какому варианту рис. 7а или рис. 7б надо подключить вольтметр и амперметр для измерения прямой ветви вольтамперной характеристики диода? Обратной ветви?
7. Какова сила тока в цепи на рисунке 10, если напряжение питания 1В; 10 В; 30 В?
8. Какова сила тока в цепи на рис. 12, если напряжение питания 30 В?
9. Какую физическую величину измеряют прибором с рисунка? По какой шкале надо считывать значения? Чему равна измеряемая величина?



10. На приборе с рисунка измеряют силу тока на диапазоне 10 мА. Чему равна измеряемая величина?



Литература

1. Грачев А.В., Погожев В.А., Салецкий А.М., Боков П.Ю. Физика. 11 класс. М.: «Вентана-Граф», 2015, 464 с., 1 Глава.
2. Новиков М.Г. Физика работы светодиода. <http://novikov.gq/>.
3. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Электроизмерительные механизмы](https://ru.wikipedia.org/wiki/Электроизмерительные_механизмы).
4. Митин И.В., Русаков В.С. Анализ и обработка экспериментальных данных. М.: Физический факультет МГУ, 2012, 43 с.