



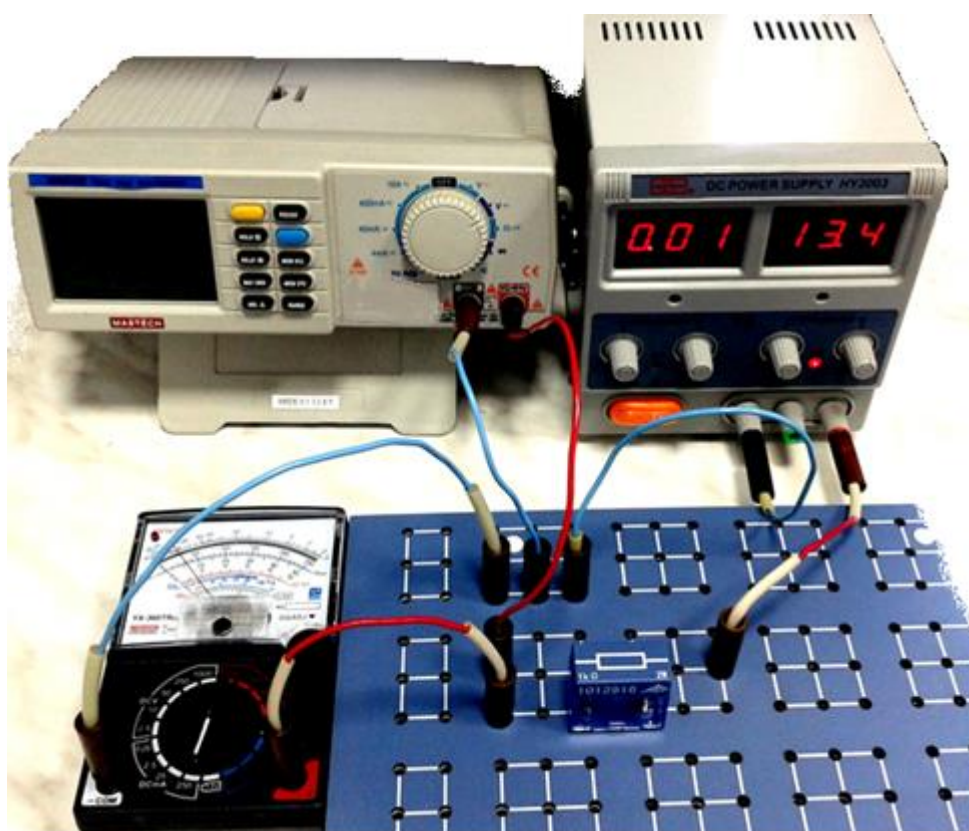
**Физический факультет МГУ
КАФЕДРА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ**

**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 2019

Лабораторная работа № 3
ИЗМЕРЕНИЯ В ЦЕПЯХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы

Освоить основные навыки работы с 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 проводника есть отношение работы сил электрического поля при перемещении пробного заряда вдоль проводника из начальной точки в конечную, к величине этого заряда.

Электродвижущая сила – физическая величина, равная отношению работы *сторонних сил* по перемещению пробного положительного заряда внутри источника тока от его отрицательного полюса к положительному, к величине этого заряда.

Сторонние силы – силы неэлектрического происхождения, совершающие работу по переносу зарядов против сил электростатического поля.

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 проводами.

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 сопротивление 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 тока, протекающего через него. 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.

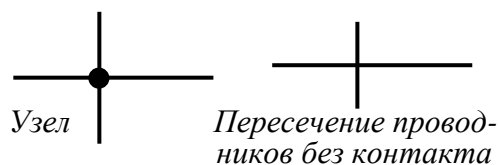
Идеальный источник тока – источник энергии, ток которого при любом напряжении на его выводах остается неизменным.

Закон Ома. Напряжение U между концами проводника равно произведению силы тока I , протекающему по нему, и сопротивлению проводника 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 электрической цепи – это зависимость тока от напряжения или напряжения от тока для данного элемента. ВАХ является основной характеристикой элемента, необходимой для описания его работы в электрических цепях.

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

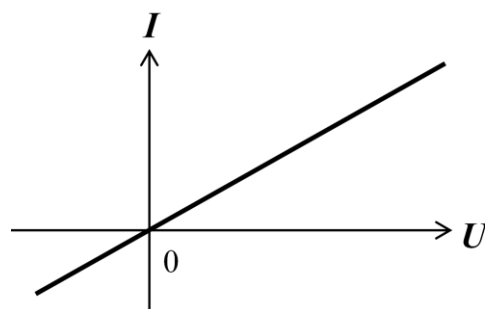


Рис. 1. Вольтамперная характеристика резистора.

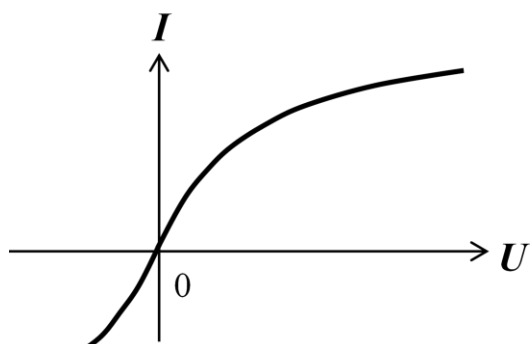


Рис. 2. Вольтамперная характеристика лампы накаливания.

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 **лампы 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).

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 р-п переходом представлена на рис. 3.

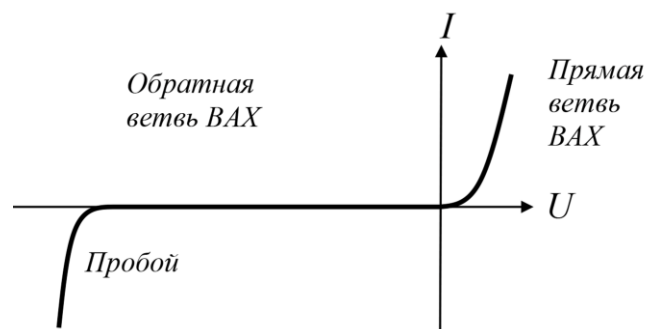


Рис. 3. Вольтамперная характеристика диода.

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

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 светодиод обычным диодом (или другим светодиодом, см. рис. 13), включенным параллельно 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 вольт-амперные 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 вольт-амперных характеристик светодиодов из разных материалов связано с различной шириной запрещенной зоны полупроводника. Чем меньше длина волны излучения, тем больше прямое падение напряжения на диоде и потери электрической энергии в нем. Обратные ветви вольт-амперных характеристик соответствуют относительно малым пробивным напряжениям, что объясняется малой толщиной $p-n$ переходов.

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.).

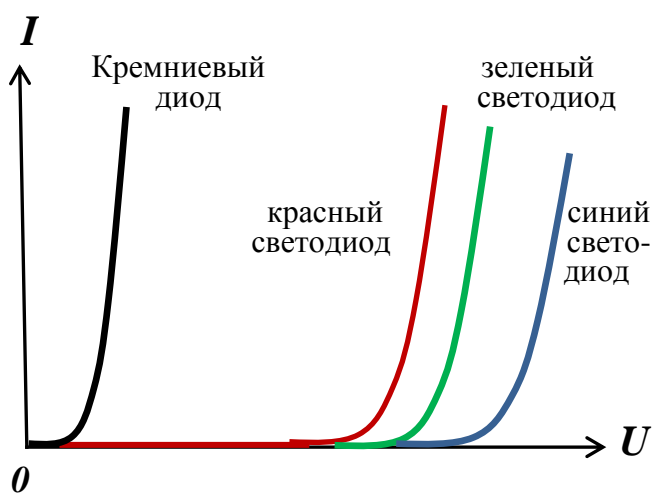


Рис. 4. ВАХ кремниевого диода и светодиодов.

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 "А" 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).

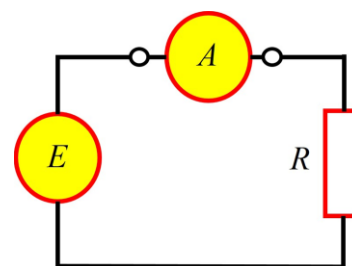


Рис. 5. Подключение амперметра А в исследуемую цепь; E – ЭДС, R – сопротивление цепи.

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 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

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

где n – число, показывающее, во сколько раз увеличен предел измерения, $r_{ш}$ – 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 искажать 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 такого прибора 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

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

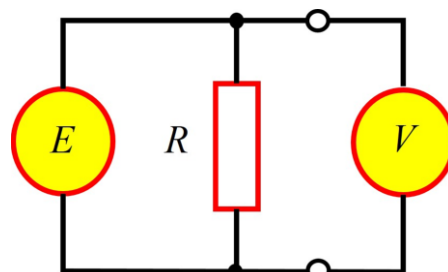


Рис. 6. Подключение вольтметра V в исследуемую цепь; E – ЭДС, R – сопротивление, на котором измеряется напряжение.

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

Цифровые вольтметры имеют, как правило, большую точность измерения напряжения, и их внутреннее сопротивление значительно превышает сопротивление аналоговых вольтметров.

При одновременном измерении силы тока и напряжения в цепи возможны два варианта подключения приборов, представленные на рис.7. Для выбора правильного варианта подключения надо учитывать, что реальные приборы имеют внутренние сопротивления, которые повлияют на токи в цепи. Вариантом (а) можно пользоваться, когда внутреннее сопротивление вольтметра r_v значительно превышает сопротивление участка цепи R (сопротивление амперметра r_A может быть сравнимо с R), а вторым (б) – когда внутреннее сопротивление амперметра r_A значительно меньше величины R .

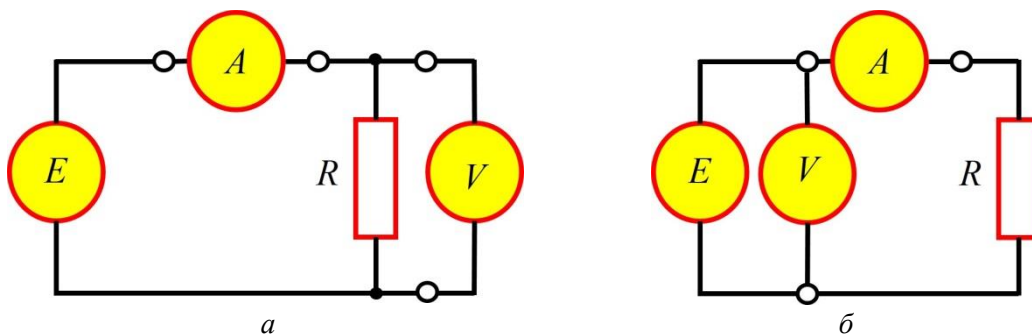


Рис. 7. Два варианта схем включения приборов при одновременном измерении силы тока и напряжения.

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.

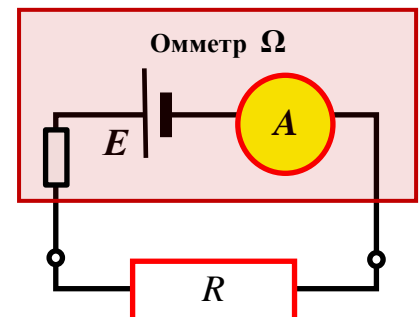


Рис. 8. Простейший омметр последовательного включения.

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*). Принято считать, что предельная погрешность связана со среднеквадратичной погрешностью формулой $\sigma \approx \Delta_{\text{пред}}/3$.



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

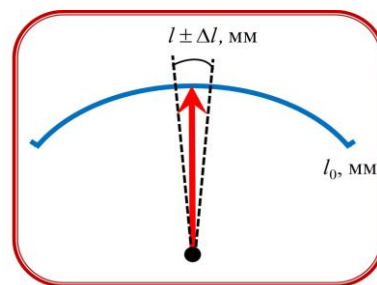
Погрешности при измерениях стрелочными приборами

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

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 $\sigma_{\text{случ}}$ 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, который надо использовать для измерения напряжения (работает от сети 220 В) - 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, который надо использовать для измерения силы тока (не подключен к сети 220 В) - примеры



YX – 360TRes

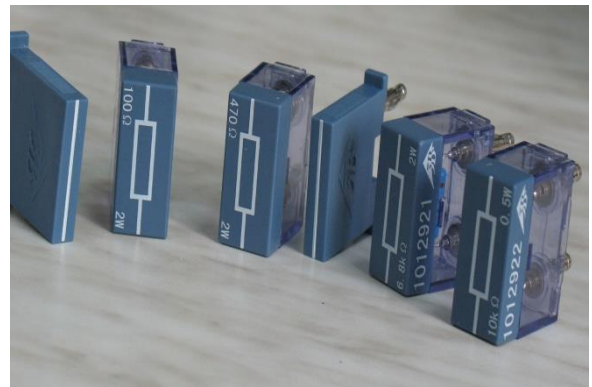


MASTECH M830B

Приборные погрешности при измерении постоянного тока.
 $\pm(1\% X + 2D)$
 X – измеренная величина,
 D – разрешение.

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, проверка работы приборов, определение внутреннего сопротивления амперметра.

Амперметр – прибор, который подвергается повышенной опасности при работе – он часто выходит из строя. Поэтому перед началом измерений надо обязательно проверить работоспособность прибора.

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 мультиметр, работающий от сети) не надо выключать после каждого упражнения. Надо уменьшить напряжение на БП до «0», вынуть штекера из клемм прибора.

- Мультиметр, работающий от сети, в данной работе надо использовать в режиме работы измерения постоянного напряжения «V→». Включите мультиметр поворотным переключателем, выставив режим «V→». Замкните проводником клеммы «COM» и «VΩ...», на индикаторе мультиметра должны быть нули
- В данной работе мультиметр, не подключенный к сети надо использовать как амперметр постоянного тока – в режиме работы ДСмА. Поставьте поворотный переключатель мультиметра в режим работы ДСмА, с максимальным пределом измерения (например, 250 мА). Для стрелочного прибора 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 «ДСмА» или «→». Определите цену деления шкалы амперметра на других диапазонах (например, 25 мА и 2,5 мА, или 10 мА), запишите в табл. 1.

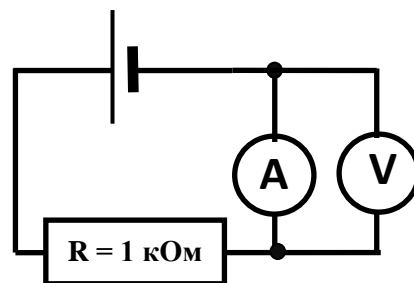


Рис. 10. Схема для определения внутреннего сопротивления амперметра.

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. На амперметре **начальный предел измерения – максимальный**. На вольтметре (цифровом мультиметре M9803R или MS8040) диапазоны измерения 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 «-»**. Блок питания подключают к схеме в последнюю очередь. **Прежде, чем подключать блок питания, преподаватель должен проверить Вашу схему.**

- 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.

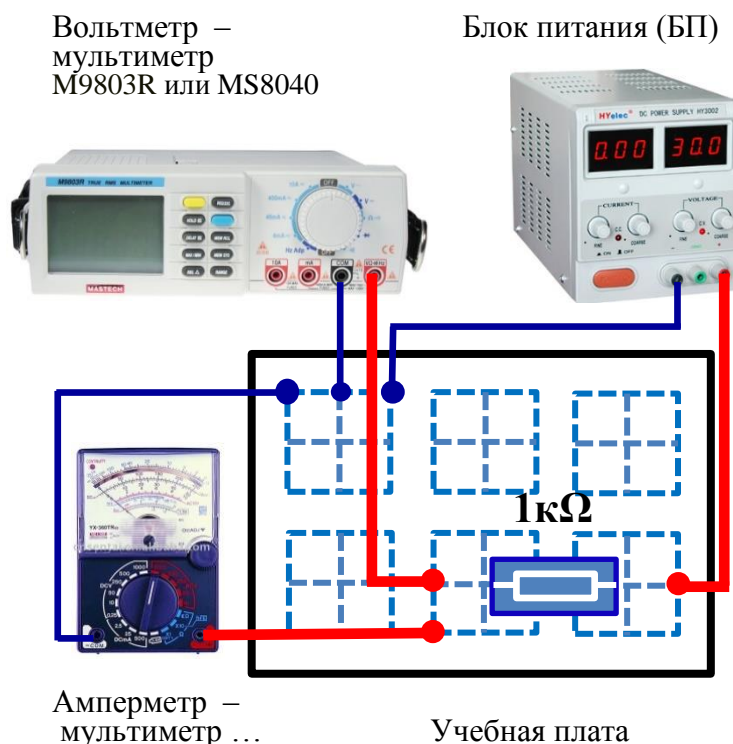


Рис. 11. Блок-схема для определения внутреннего сопротивления амперметра.

- Уменьшите напряжение на БП до «0».
- Определите напряжение на БП для других диапазонов измерения амперметра. **Максимальное напряжение, которое можно использовать для работы на определенном диапазоне измерения амперметра**

$$U_{\text{пит макс}} = I_{\text{диап изм}} * (r_a + R) \approx I_{\text{диап изм}} * R.$$

Для того, чтобы ток был не максимальный для диапазона, выберем напряжение питания в 2 раза меньше и, с учетом того, что $R = 1 \text{ кОм}$, рассчитайте и запишите в табл. 1 по формуле $U_{\text{пит}}(\text{В}) \approx I_{\text{диап изм}}(\text{А}) * 500$.

- Поставьте следующий после максимального диапазон измерения силы тока. Установите на БП напряжение, рассчитанное в п.5 для данного диапазона. Измерьте напряжение на клеммах амперметра и силу тока через амперметр, результаты занесите в табл. 1.
- Уменьшите напряжение на БП до «0». Аналогично п. 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.

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

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

Обработка результатов

1. Вычислите погрешность измерения силы тока:
Для стрелочного мультиметра, с учетом приборной погрешности и погрешности 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.

Для цифрового мультиметра:

$\pm(1\% X + 2D)$ или по описанию на рабочем месте

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

Результаты запишите в табл. 1.

2. Вычислите погрешность измерения напряжения 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. Запишите вывод: при каких измерениях в цепи можно не учитывать внутреннее сопротивление амперметра (пренебречь им).

Упражнение 2. Определение удельного сопротивления константанового провода.

Рассчитайте силу тока в цепи рис. 12, если сопротивление константанового провода $R_{пров} \ll R$ ($R = 470 \text{ Ом}$), а напряжение на блоке питания 30 В.

Измерения

1. Соберите электрическую схему, в соответствие с рис. 12, константановый провод возьмите по указанию преподавателя. Дополнительное сопротивление $R = 470 \text{ Ом}$. Проверьте, что диапазон измерения амперметра

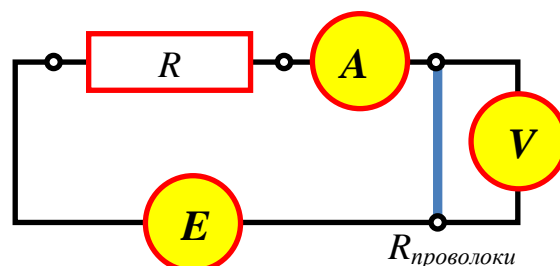


Рис. 12. Схема измерений сопротивления константановой проволоки.

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

- 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 константовом проводе U не менее четырех–пяти раз на каждом диапазоне измерения. Когда показания амперметра при уменьшении напряжения станут меньше, чем величина меньшего диапазона измерения, переключите амперметр на меньший диапазон, предварительно отключив блок питания (достаточно вынуть провод из гнезда блока питания «+»). Результаты измерений запишите в табл. 2. Измерения проводить однократно: для каждого напряжения – одно измерение силы тока. Для дальнейшего вычисления погрешностей измерений диапазон измерений амперметра записывайте в табл. 2.

Таблица 2. **VAX константового провода** $L = \dots$ м; $d = \dots$ мм

N	$U, В$	$\sigma_U, В$	$I, мА$	Диап. изм. $I, мА$	$\sigma_I, мА$
...					

- По окончании измерений напряжение на БП уменьшите до «0». Разберите схему.
- *По указанию преподавателя измерьте сопротивление константового провода омметром. Для этого мультиметр М9803R или MS8040 переключите в режим измерения сопротивления « Ω » и присоедините его непосредственно к константовому проводу. По указанию преподавателя измерьте сопротивления всех константовых проводов на плате. Запишите результаты измерений в табл.2*. Переключите мультиметр в режим «V–».

Таблица 2*. **Сопротивления константовых проводов**

N	$d, мм$	$L, м$	$R, Ом$	$\sigma_R, Ом$	$S_{пр}, мм^2$	ρ, \dots	σ_ρ, \dots
1	0,15	0,5					
2	0,25	0,5					
3	0,40	0,5					
4	0,15	1,0					
5	0,15	1,5					

Обработка результатов

- Вычислите погрешность измерения тока и напряжения аналогично упр. 1, запишите в табл. 2.
- Измерения U и I выполнены совместно, и для обработки результатов следует использовать метод наименьших квадратов (МНК) [4]. Точность измерения U выше точности измерения I (ввиду различия приборов), поэтому надо использовать модель $I(U)=AU$, где $A=I/R$. Обработку проводить в рамках линейной модели: $y = Ax$, определите A (с погрешностью).

3. Для заданной константовой проволоки вычислите сопротивление $R=I/A$ и σ_R . (*сравните с измеренным в п. 4).
4. Постройте график зависимости $I(U)$ для заданной проволоки.
5. Рассчитайте поперечное сечение провода по формуле: $S_{\text{пр}} = \pi d^2/4$.
6. Вычислите удельное сопротивление ρ константана

$$\rho_j = \frac{R_j \cdot (S_{\text{пр}})_j}{L_j}.$$

Сравните полученные результаты с табличными значениями, которые можно найти в справочниках (книжных изданиях или в интернете). Запишите, где нашли эти справочные данные (по образцу списка литературы в конце пособия, для книжного варианта запишите конкретную страницу).

7. * Рассчитайте поперечное сечение разных проводов по формуле п.5. Вычислите удельное сопротивление ρ константана, аналогично п.6, запишите в табл. 2*. Оцените погрешность удельного сопротивления (учитывая только погрешность сопротивления). Найдите среднее значение удельного сопротивления (и его погрешность) по МНК.

Упражнение 3. Измерение ВАХ нелинейного элемента - светодиода.

В данном упражнении измеряется ВАХ полупроводникового $p-n$ перехода светодиода на постоянном токе. Чтобы не работать на обратной ветви ВАХ и избежать пробоя светодиода, используют два светодиода, подключенных параллельно, навстречу друг другу.

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 $10-25 \text{ мА}$.
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.

4. Напряжение питания надо регулировать, устанавливая ток в цепи от 4–5 до 0 мА с шагом 0,1 – 1 мА. Шаг выбирается из условия четкого представления хода ВАХ во всех ее участках (см. рис.4). Обязательно зафиксировать максимальное напряжение, при котором ток в цепи еще не течет $I = 0$, светодиод не светится. Результаты измерений запишите в табл. 3. Запишите цвет светодиода.
5. 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 3. **ВАХ светодиодов**

Цвет светодиода	№	U , В	σ_U , В	I , мА	Диап. изм. I , мА	σ_I , мА
	1			0		
	2					
	...					
	10					
	1			0		
	2					
	...					
	10					

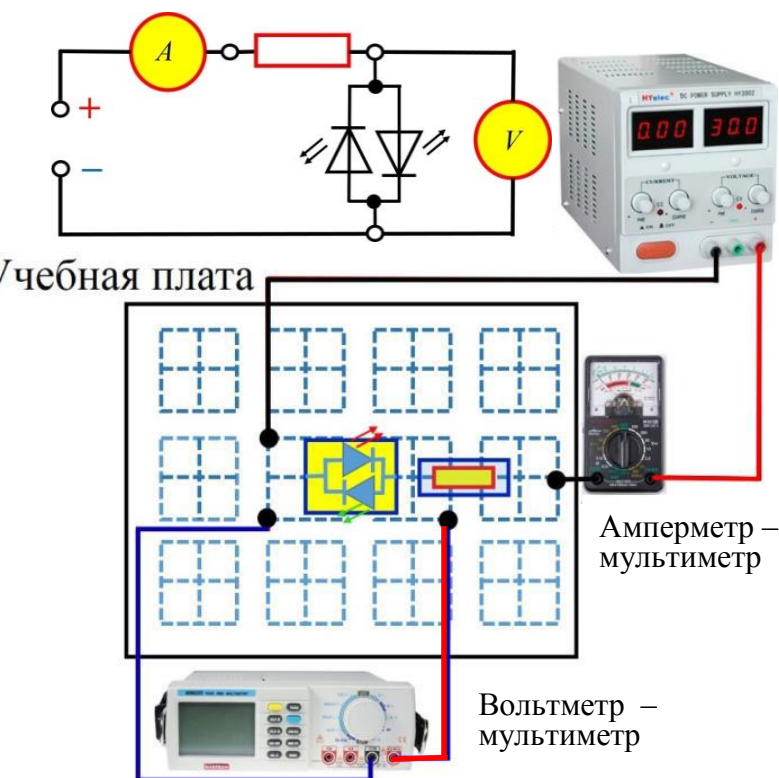


Рис. 13. Электрическая схема и блок-схема соединения элементов для измерения ВАХ светодиодов.

Обработка результатов

1. Определите погрешности измерений напряжения и силы тока аналогично упр. 1, запишите в табл. 3.

2. 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

В данном упражнении надо убедиться в выполнении правил Кирхгофа и проверить влияние внутреннего сопротивления амперметра на токи в ветвях цепи и напряжениях на элементах.

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). Сопротивления резисторов 6,8 КОм; 1КОм; 330 Ом; 470 Ом (номера резисторов выберите произвольно). Какова сила тока через резисторы в цепи, если напряжение питания 30В? Как будет влиять внутреннее сопротивление амперметра $r_A=100$ Ом на токи в ветвях при последовательном подключении амперметра в разные ветви?

1. Соберите электрическую цепь, блок-схема которой представлена на рис. 14. Переключки выставлять обязательно – вместо них надо будет подключать амперметр. Запишите номиналы резисторов (из предложенного на рабочем месте набора) в табл. 4.
2. Подключите вольтметр для измерения напряжения на БП. Подключите амперметр (с максимальным пределом измерения) вместо переключки в ветвь цепи с R1.
3. Перед подключением БП пригласите преподавателя проверить собранную схему. Подключите БП, выставьте на нем выходное напряжение 10 В (или другое, заданное преподавателем) – во время работы это напряжение менять нельзя, запишите это напряжение (измеренное вольтметром).
4. Подключите вольтметр к R1. Измерьте U_{R1}^* , запишите в табл. 4 (U_{R1}^* – напряжение, измеренное одновременно с I). Измерьте силу тока, запишите в табл.4
5. Вместо амперметра поставьте в схему перемычку. Еще раз измерьте напряжение на R1 – теперь независимо измеряя напряжение, запишите U_{R1} в табл. 4, сравните с измерениями U_{R1}^* из п. 4.
6. Измерьте силу тока и напряжения на остальных резисторах, аналогично пп. 4–5.

Измерения

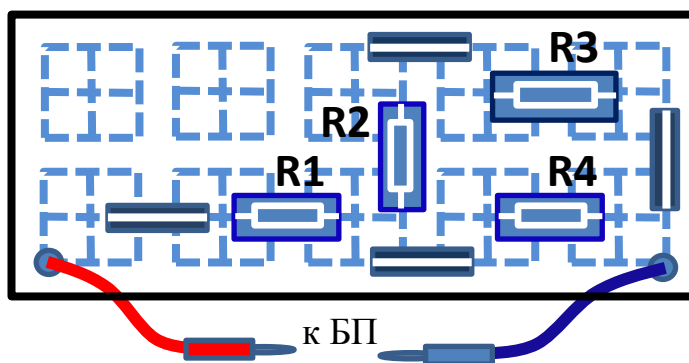


Рис. 14. Блок-схема электрической цепи для проверки правил Кирхгофа.

Таблица 4. Измерения силы тока и напряжения в разветвленной цепи.
 $U_{пит} = \dots\dots\dots В.$

№	R, Ом	расчет		I, mA	Диап. изм. I, mA	ΔI , mA	одновременно		независимо	
		R, Ом	ΔR , Ом				U^* , В	ΔU , В	U, В	ΔU , В
1										
2										
3										
4										

Обработка результатов

1. Определите погрешности измерений напряжения и силы тока аналогично упр. 1, запишите в табл. 4.
2. Сравните независимые и одновременно измеренные с силой тока напряжения на резисторах U_i . Объясните полученные результаты.
3. Рассчитайте сопротивления резисторов (и их погрешностей) из измеренных значений силы тока и напряжения (какие значения U или U^* надо использовать?), запишите в табл. 4.
4. 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 ...

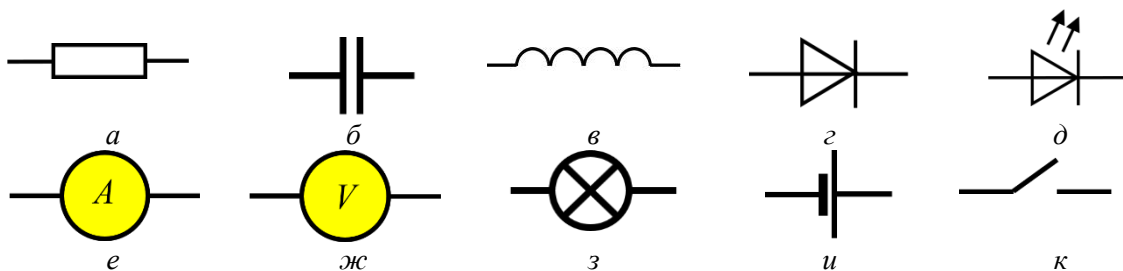
Литература

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.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте и запишите в рабочую тетрадь основные правила работы с амперметрами (см. стр. 5-6).

- Сформулируйте и запишите в рабочую тетрадь основные правила работы со светодиодами (с.4, 16).
- Назовите элементы электрических цепей:



- 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?



Рис.15

- Какую физическую величину измеряют прибором с рисунка 15? По какой шкале надо считывать значения? Чему равна измеряемая величина?

- На приборе с рисунка 16 измеряют (постоянный ток):
 - силу тока на диапазоне 10 мА. Чему равна измеряемая величина?
 - силу тока на диапазоне 250 мА. Чему равна измеряемая величина?
 - напряжение на диапазоне 50 В. Чему равна измеряемая величина?

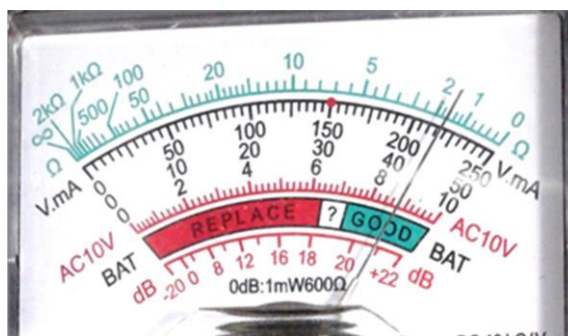


Рис.16

Приложение. Пример оформления практической работы. Можно распечатать при домашней подготовке для записи измерений на занятии.

ФИО..... группа..... число.....

Лаб. раб. 3. Измерения силы тока и напряжения в цепях постоянного тока

Приборы, находящиеся на рабочем месте:

Блок питания

Мультиметр цифровой

Мультиметр стрелочный

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

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

$U_{num},$ В	Расчет $I, \text{мА}$	Диап. изм. $I,$ мА	Цена де- ления $I,$ мА	$I, \text{мА}$	$\sigma_I,$ мА	$U_a, \text{мВ}$	$\sigma_U,$ В	$R_a,$ Ом	$\sigma_R,$ Ом
30		250							
6		10							
1		2,5							

Упражнение 2. Определение удельного сопротивления константанового провода.

Таблица 2. VAX константанового провода $L = \dots\dots\dots$ м; $d = \dots\dots\dots$ мм

N	$U, \text{В}$	$\sigma_U, \text{В}$	$I, \text{мА}$	Диап. изм. $I, \text{мА}$	$\sigma_I, \text{мА}$
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

Таблица 2*. Сопротивления константановых проводов

N	$d, \text{мм}$	$L, \text{м}$	$R, \text{Ом}$	$\sigma_R, \text{Ом}$	$S_{пр}, \text{мм}^2$	ρ, \dots	σ_ρ, \dots
1	0,15	0,5					
2	0,25	0,5					
3	0,40	0,5					
4	0,15	1,0					
5	0,15	1,5					

ФИО..... группа..... число.....

Лаб. раб. 3 продолжение.

Упражнение 3. Измерение ВАХ нелинейного элемента.

Таблица 3. ВАХ светодиодов

Цвет светодиода	№	U , В	σ_U , В	I , мА	Диап. изм. I , мА	σ_I , мА
	1			0		
	2					
	3					
	4					
	5					
	6					
	7					
	8					
	9					
	10					
	1			0		
	2					
	3					
	4					
	5					
	6					
	7					
	8					
	9					
	10					

Упражнение 4. Проверка выполнения правил Кирхгофа

Таблица 4. Измерения силы тока и напряжения в разветвленной цепи.

$U_{пит} = \dots\dots\dots$ В.

№	R, Ом	расчет		I, мА	Диап. изм. I, мА	ΔI , мА	одновременно		независимо	
		R, Ом	ΔR , Ом				U^* , В	ΔU^* , В	U, В	ΔU , В
1										
2										
3										
4										