

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
МГУ им. М.В. ЛОМОНОСОВА



ВВЕДЕНИЕ В ТЕХНИКУ ЭКСПЕРИМЕНТА

Лабораторный практикум

Ананьева Н.Г., Колмычек И.А., Салецкий А.М.

Лабораторная работа № 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА



2016

Лабораторная работа № 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы

Научиться измерять силу тока и напряжение аналоговыми и цифровыми приборами, оценивать приборные погрешности. Исследовать некоторые элементы в цепях постоянного тока.

Теоретическое введение

Электрический ток – это упорядоченное движение заряженных частиц. Его количественной мерой служит сила тока I , равная количеству заряда dQ , проходящего через рассматриваемую поверхность S за время dt :

$$I = \frac{dQ}{dt}.$$

Сила тока измеряется в амперах (А).

Согласно закону Ома, сила тока в однородном проводнике пропорциональна разности потенциалов на его концах:

$$I = \frac{\Delta\varphi}{R} \equiv \frac{U}{R},$$

где $U = |\Delta\varphi| = |E_{\text{дл}}|$ называют также напряжением (падением напряжения), E – напряженность электростатического поля в проводнике, R – электрическое сопротивление проводника. Если на заряды в проводнике действуют также сторонние силы (не электростатические), поле которых характеризуется напряженностью $E_{\text{стор}}$, то по обобщенному закону Ома:

$$IR = \Delta\varphi + \varepsilon,$$

где ε – электродвижущая сила:

$$\varepsilon = \int_1^2 E_{\text{стор}} dl.$$

Различают цепи *постоянного тока* (не изменяющегося во времени) и *переменного тока*.

Электрическая цепь – это совокупность устройств, образующих «путь» для электрического тока. В электрической цепи осуществляется производство (генерация) электрической энергии, ее распределение и преобразование в другие виды энергии. Все процессы, связанные с генерацией или преобразованием энергии, описываются в терминах *ток*, *напряжение* и *ЭДС (электродвижущая сила)*.

Отдельные устройства, входящие в состав электрической цепи, называются *элементами цепи*, они соединяются между собой проводами или *линиями передачи*.

Электрическим сопротивлением R характеризуют противодействие проводящей среды движению электрических зарядов, т.е. току. Резистором называется элемент электрической цепи, основным параметром которого является его электрическое сопротивление R .

Сопротивление однородного проводника

$$R = \rho \frac{L}{S}, \quad (3.1)$$

где L – длина проводника, S – площадь поперечного сечения, ρ – удельное сопротивление.

Величина, обратная сопротивлению, называется проводимостью G .

Величина $\sigma = \frac{1}{\rho}$ называется удельной электропроводностью материала проводника. Она зависит от свойств материала и температуры (влажности, давления, освещенности и т.д.)

Схема электрической цепи представляет собой графическое изображение последовательности соединения элементов электрической цепи (в условных обозначениях). Элементами схем электрических цепей постоянного тока являются резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, диоды и другие элементы.

Электрические цепи принято классифицировать по нескольким признакам.

- По виду тока различают цепи *постоянного и переменного тока*.
- По характеру параметров элементов различают *линейные и нелинейные* цепи. К линейным относят цепи, в которых электрическое сопротивление R каждого участка не зависит от величины и направления тока и напряжения. В линейной цепи, кроме резисторов, могут быть катушки индуктивности, конденсаторы, трансформаторы (без сердечников).
- Кроме того, 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, элементы которого соединены последовательно. Ток в элементах один и тот же.

Узел электрической цепи – точка соединения трех и более ветвей.

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 сопротивления нагрузки, и у него есть вольтамперная характеристика. Но часто в расчетах можно ограничиться моделью источника энергии с двумя параметрами: ЭДС E и постоянным 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

$$U = E - R_0 I. \quad (3.2)$$

Источник ЭДС, внутренним сопротивлением R_0 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.

В основе методов анализа цепей лежат закон Ома и правила Кирхгофа.

Закон Ома. Согласно закону Ома, сила тока I , протекающего через проводник, прямо пропорциональна напряжению U на проводнике и обратно пропорциональна сопротивлению проводника R :

$$I = \frac{U}{R}. \quad (3.3)$$

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. Так, *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 всех ветвей любого узла электрической цепи равна нулю:

$$\sum_{k=0}^n I_k = 0. \quad (3.4)$$

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

$$\sum_{k=0}^n E_k = \sum_{k=0}^m I_k R_k. \quad (3.5)$$

Вольтамперной характеристикой (ВАХ) элемента называется зависимость силы тока от напряжения (или напряжения от силы тока) для данного элемента. **Резистор** называют линейным элементом, потому что его вольтамперная характеристика – прямая линия (рис. 3.1), угол наклона которой зависит от сопротивления резистора.

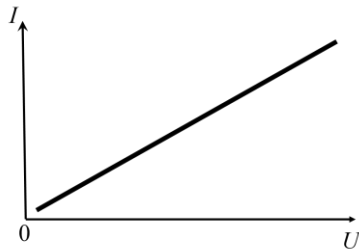


Рис. 3.1. Вольтамперная характеристика резистора.

У нелинейных элементов сопротивление не является постоянной величиной. Вольтамперная характеристика таких эле-

ментов - нелинейная. Примерами нелинейных элементов являются лампы накаливания, полупроводники и др. ВАХ является основной характеристикой нелинейного элемента, необходимой для описания его работы в электрических цепях. Измерения ВАХ можно проводить как на постоянном токе, так и на переменном, т.е. в динамическом режиме.

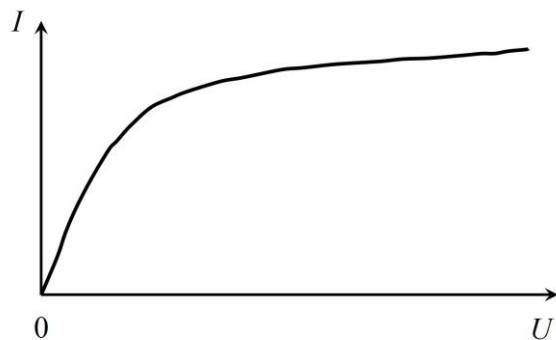


Рис. 3. 2. Вольтамперная характеристика лампы накаливания.

Рассмотрим ВАХ некоторых нелинейных элементов. Как известно, основным элементом **лампы накаливания** является вольфрамовая нить. При пропускании через неё тока она нагревается до высоких температур и излучает свет. При этом с повышением температуры сопротивление нити линейно возрастает. Поэтому ВАХ лампы накаливания оказывается нелинейной (см. рис. 3.2).

Другим примером нелинейного элемента 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. 3.3. Полупроводниковые вы-

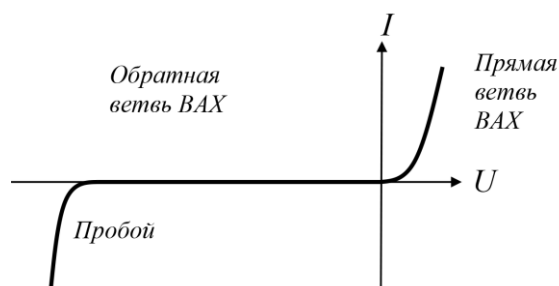


Рис. 3.3. Вольтамперная характеристика диода.

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

В отличие от обычного выпрямительного диода, *стабилитрон* работает 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. Напряжение пробоя у них небольшое (единицы вольт). При кратковременном включении светодиода в обратном направлении и небольшом напряжении его свойства после пробоя могут восстановиться, но могут и привести и к необратимым разрушениям. Поэтому необходимо соблюдать полярность подключения светодиода. При работе с переменным током, во избежание пробоя светодиода параллельно ему подключают другой диод, чтобы направления пропускания тока светодиодами было противоположными.

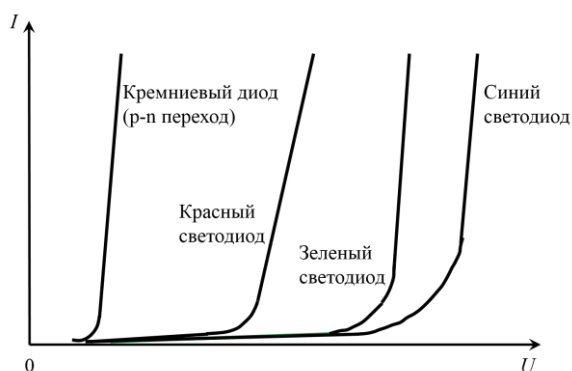


Рис. 3.4. ВАХ кремниевого диода и светодиодов.

На рис. 3.4 представлены вольтамперные характеристики светодиодов, изготовленных из разных полупроводниковых материалов. Из рис. 3.4 видно, что при прямом включении ток в светодиодах начинает течь (светодиод «открывается» – начинает светиться) при больших напряжениях, чем в диодах. Различие прямых ветвей вольт-

амперных характеристик из разных полупроводниковых 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 вольт-амперных характеристик соответствуют относительно малым пробивным напряжениям, что объясняется малой толщиной p – n переходов. Светодиоды работают только при прямом включении.

Графический расчет цепей. Системой уравнений Кирхгофа описываются только линейные цепи. Расчет нелинейных цепей проводят, как правило, графически. Для этого должны быть известны вольтамперные характеристики входящих в схему нелинейных элементов.

При последовательном соединении линейного и нелинейного элемента сила тока, проходящего через элементы тока, будет одинакова для обоих

элементов, а приложенное к цепи напряжение равно сумме напряжений на элементах:

$$I_1 = I_2 = I, \quad (3.6)$$

$$U_1 + U_2 = U. \quad (3.7)$$

Чтобы получить ВАХ $I(U)$

для последовательно соединенных элементов надо графики $I_1(U)$ и $I_2(U)$ «сложить по горизонтали». На рис. 3.5 представлена такая операция графического сложения для некоторого тока I_0 .

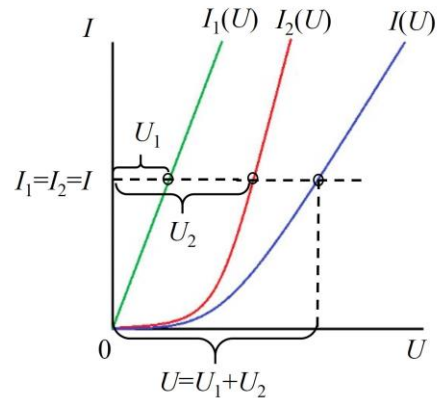


Рис. 3.5. Графическое построение вольт-амперной характеристики двух последовательно соединенных элементов.

При параллельном соединении двух элементов общим для них является напряжение, а ток равен сумме токов в ветвях:

$$U_1 = U_2 = U_0 \quad (3.8)$$

$$I = I_1 + I_2. \quad (3.9)$$

Чтобы получить ВАХ

$I(U)$ для параллельно соединенных элементов надо графики $I_1(U)$ и $I_2(U)$ «сложить по вертикали». На рис. 3.6 представлена такая операция графического сложения для некоторого фиксированного напряжения U_0 .

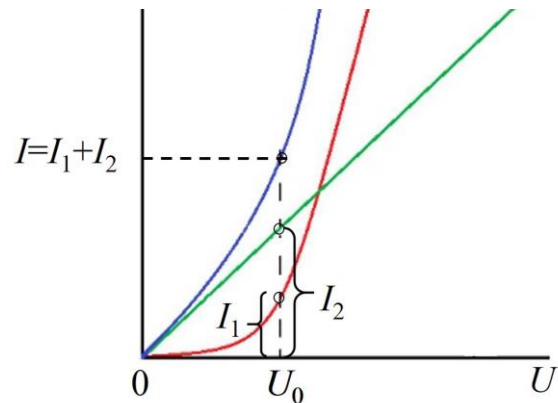


Рис. 3.6. Графическое построение вольт-амперной характеристики двух параллельно соединенных элементов.

Измерение силы тока и напряжения. Приборы бывают *аналоговые* (чаще всего со стрелочными индикаторами) и *цифровые*

(обычно с цифровыми индикаторами). С цифровых индикаторов проще считывать показания, но когда необходимо следить за несколькими 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 как в цепях постоянного, так и переменного тока. *Комбинированные приборы*

(мультиметры) предназначены для измерения различных электрических величин (U , I , R и др.).

Измерение силы тока осуществляют с помощью приборов, называемых **амперметрами**. В основе работы стрелочных амперметров лежит однозначная зависимость угла поворота стрелки индикатора, соединенной

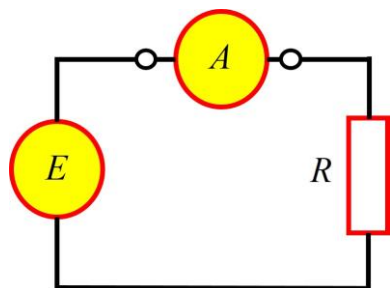


Рис. 3.7. Подключение амперметра в исследуемую цепь: E – ЭДС, R – резистор.

с подвижным узлом, от величины силы тока, протекающего через измерительный узел прибора. Амперметры включают последовательно, в разрыв цепи, на том ее участке, где необходимо определить силу тока (рис. 3.7). Шкалы амперметров обычно градуируют непосредственно в единицах силы тока: амперах (А) или миллиамперах (mA), микроамперах (μA).

Чем меньше внутреннее сопротивление амперметра, тем меньше он 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. Для расширения пределов измерений амперметра параллельно ему подключают резисторы шунты, сопротивление которых меньше внутреннего сопротивления прибора. Сопротивление шунта определяется из соотношения

$$r_{\text{ш}} = \frac{r_A}{n-1}, \quad (3.10)$$

где n – коэффициент увеличения предела 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 измерения.

При измерении силы постоянного тока универсальными и комбинированными приборами переключатель рода работы следует установить в положение, соответствующее измерению силы тока в режиме "постоянный ток" ("–"). Отсчет показаний при этом производится по той шкале, напротив которой указаны символы "–" и "А" (или "mA", " μA "). 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".

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, а показания амперметра меньше, чем предел меньшего диапазона измерения, то надо перейти на меньший предел, *предварительно отключив прибор из цепи*.
2. Сопротивление амперметра должно быть достаточно малым, чтобы как можно меньше искажался ток в цепи. Поэтому, если подключить амперметр неправильно (например, параллельно элементу с большим сопротивлением или непосредственно к источнику питания), то ток через амперметр может превысить допустимое значение и прибор выйдет из строя.

Для измерения напряжения на участке цепи (разности потенциалов на его концах), применяют приборы – **вольтметры**, подключаемые параллельно исследуемому участку (рис. 3.8). Фактически аналоговый вольтметр (кроме приборов некоторых систем, например электростатической) представляет собой амперметр, которому последовательно добавлен шунт с достаточно большим сопротивлением, шкала которого проградуирована в единицах напряжения – вольтах (В, мВ, мкВ, кВ). Однако, в отличие от амперметров, внутреннее сопротивление вольтметра r_v должно быть как можно больше, чем сопротивление R того участка цепи, 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.

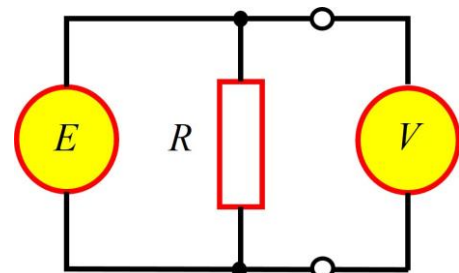


Рис. 3.8. Подключение вольтметра в исследуемую цепь: E – ЭДС, R – резистор, на котором измеряется напряжение.

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

$$r_d = (n - 1)r_v, \quad (3.11)$$

где n – коэффициент увеличения предела измерений. Размещение внутри корпуса прибора нескольких добавочных сопротивлений и переключателя

дает возможность конструировать многопредельные вольтметры. На их лицевых панелях рядом с переключателем пределов измерений, указывают *максимальные значения разности потенциалов*, которые могут быть измерены при том или ином положении переключателя.

При использовании комбинированных многопредельных приборов переключатель рода работы должен быть установлен в положение, соответствующее измерению напряжения в цепи постоянного тока (оно обычно обозначается символами "-", "+U", "-U" или "V"). Отсчет показаний производится по тем шкалам, рядом с которыми указаны символы "V" и "-". Цена делений определяется для каждого предела измерений или для каждой шкалы в отдельности.

При выполнении измерений напряжения в цепях постоянного тока следует, так же как и при измерениях силы тока, соблюдать полярность подключения прибора к цепи. 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 «-».

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

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.

При одновременном измерении силы тока и напряжения в цепи возможны два варианта подключения приборов, представленные на рис. 3.9. 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?).

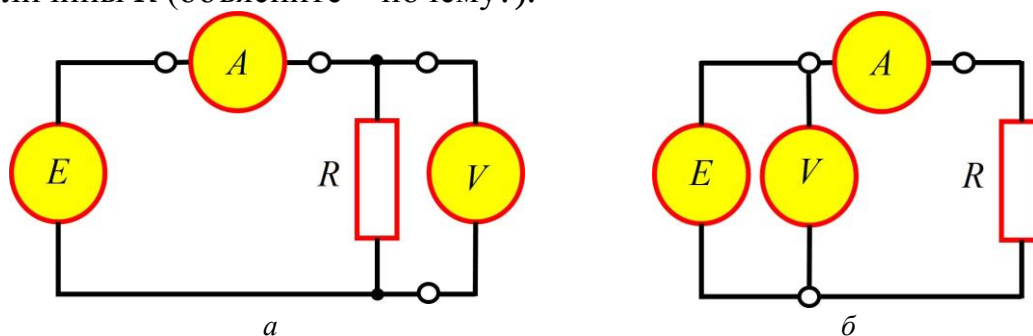


Рис. 3.9. Два варианта схем включения приборов при одновременном измерении силы тока и напряжения.

Приборные погрешности. В зависимости от принципа действия прибора погрешности измерения могут рассчитываться на основе:

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

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

Приборные погрешности обусловлены:

- разными условиями проведения измерений (температура, влажность, и т.д.) – в инструкции к прибору указывают условия, которые необходимо соблюдать;
- разбросом 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 приборов партии всей партии присваивают некоторую погрешность измерения. В этой партии будут попадаться приборы и более точные, и более грубые. При этом основная погрешность обусловлена систематической составляющей (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*). Считается, что предельная погрешность связана со

среднеквадратичной погрешностью формулой $\sigma \approx \frac{\Delta_{\text{пред}}}{3}$.

- Невозможно абсолютно точно считать результат измерения. В аналоговых приборах, как правило, положение стрелки не совпадает с масштабными рисками, или риски на линейке не совпадают с измеряемым объектом. В цифровых приборах ограничено количество выводимых на дисплей цифр. В аналоговых приборах погрешность считывания обычно оценивают как

$\sigma_{\text{счит}} = \frac{\omega}{\sqrt{12}}$, где ω – цена наимень-

шего деления шкалы в окрестности точки измерения. В случае цифровых приборов погрешность считывания учитывают в формуле для расчета погрешности, которая приводится в паспорте.

На рис. 3.10 приведена фотография десяти мультиметров, работающих в режиме измерения тока и соединенных последовательно (т.е. измеряющих один и тот же ток): виден разброс показаний амперметров.



Рис. 3.10. Показания амперметров, соединенных последовательно.

Погрешности при измерениях стрелочными приборами. Погрешность считывания: $\sigma_{\text{счит}} = \frac{\omega}{\sqrt{12}}$, где ω – цена наименьшего деления шкалы в окрестности точки измерения.

Приборная погрешность обусловлена погрешностями работы измерительного механизма прибора (например из-за трения, неточности градуировки, влияния внешних факторов и т.д.).

Для большинства стрелочных приборов приборная погрешность зависит только от диапазона измерения и указывается в паспорте как $k\%$ от диапазона измерения I_0 :

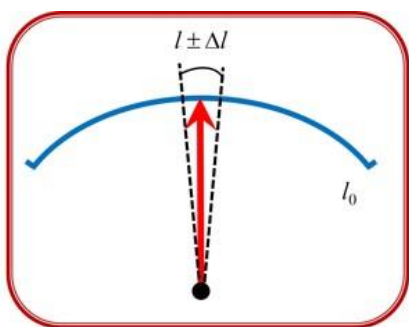


Рис. 11. Вид шкалы стрелочного прибора.

$$\Delta I = \frac{k}{100} I_0, \quad (3.12)$$

где ΔI – предельная приборная погрешность, I_0 – диапазон измерения (см. рис. 3.11).

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 пра-

вило, все они независимы. В этом случае общую погрешность (стандартное отклонение) можно оценить по формуле:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{\text{случ}}^2 + \sigma_{\text{прибор}}^2 + \sigma_{\text{счит}}^2 + \sigma_{\text{окр}}^2 + \dots} \quad (3.13)$$

На практике если какие-то из вкладов в суммарную погрешность значительно меньше других (на порядок, т.е. в 10 раз, и 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 3 - 5 раза меньше $\sigma_{\text{прибор}}$.

Экспериментальное оборудование

При проведении данной лабораторной работы используются следующие приборы и оборудование:

Блок питания Mastech		
	Параметры	Значение
	Выходное напряжение, В	0 - 30
	Точность установки выходного напряжения, В	0,1
	Выходной ток, А	0 - 3
	Точность установки выходного тока, А	0,01
Регулировка силы тока и напряжения осуществляется потенциометрами. Для каждого параметра (ток и напряжение) отведено по два регулятора: ГРУБО (COARSE) и ТОЧНО (FINE). Выходные значения тока и напряжения контролируются на 3-разрядных LED-индикаторах		

Цифровой мультиметр M9803R	
	

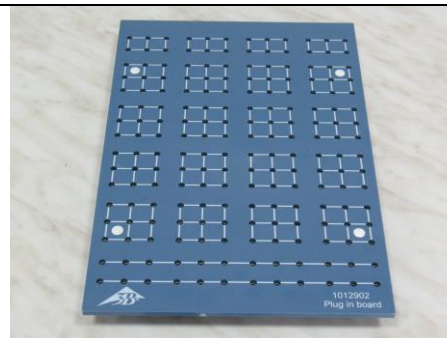
Параметры	Значение
Диапазоны измерения постоянного напряжения	400 мВ-1000 В

Диапазоны измерения переменного напряжения	4-40-400-750 В
Диапазоны измерения постоянного тока	4-40-400 мА-10 А
Диапазоны измерения переменного тока	4-40-400 мА-10 А
Диапазоны измерения сопротивления	400 Ом-4-40-400 кОм-4-40 МОм
Диапазоны измерения емкости	4-40-400 нФ-4-40 мкФ
Диапазоны измерения частоты	100 Гц-1-10-100 кГц-1 МГц

Мультиметр стрелочный YX360TRes

	Параметры	Значение
	Постоянное напряжение	2.5-10-50-250-500-1000 V
	Переменное напряжение	10-50-250-1000 V
	Постоянный ток	0,25-2,5 mA-25 mA-250 mA
	Сопротивление	Rx1Ω-Rx10 Ω -Rx1 kΩ

Плата с гнездами для установки элементов схем



Плата с пятью проволоками из константана



Набор элементов (резисторы, диоды, «черный ящик»)



Проведение эксперимента

Перед началом экспериментальной работы ознакомьтесь с описаниями приборов на рабочем месте.

Упражнение 1. Определение удельного сопротивления константана.

Измерение

1. Соберите электрическую схему в соответствии с рис. 3.12 (вставка): возьмите константановый провод толщиной 0,15 мм. На этом же рисунке представлена блок-схема соединения. $R = 330 \text{ Ом}$. В качестве амперметра используйте стрелочный мультиметр **YX360TRes**. Установите его в режим измерения постоянного тока с начальным максимальным пределом измерения 250 мА. В качестве вольтметра используйте цифровой мультиметр **M9803R**. Включите его, установите режим постоянного напряжения (диапазоны измерения в этом приборе устанавливаются автоматически). Перед включением блока питания проверьте, что **все** ручки регулировки установлены на «минимум» – повернуты до предела против часовой стрелки. **Не включать блок питания, пока преподаватель не проверит вашу схему.**

2. Включить блок питания. Ручку «Current» «Coarse» повернуть на пол оборота. Регулировать напряжение надо ручками «Voltage» «Coarse» (грубо) и «Fine» (точно). Меняя напряжение на блоке питания, измерьте ток I и напряжение U на константановом проводе не менее четырех раз. Результаты измерений запишите в табл. 3.1. Измерения проводить однократно (для каждого напряжения – одно измерение силы тока). В этом случае погрешности будут только приборные и считывания. Для мультиметра YX360TRes погрешность измерений силы тока зависит от диапазона измерений и цены деления прибора, а для цифрового мультиметра M9803R погрешность измерения напряжения зависит от диапазона. Поэтому для дальнейшего вычисления погрешностей измерений эти характеристики также записываются в табл. 3.1.

3. Аналогично проведите измерения для проводов диаметром 0,25 мм и 0,4 мм. Результаты запишите в табл. 3.1.

4. Соедините последовательно два провода диаметром 0,15 мм и проведите измерение тока I для различных значений U ; затем соедините три провода и проведите измерение тока I для различных значений U . Результаты запишите в табл. 3.1.

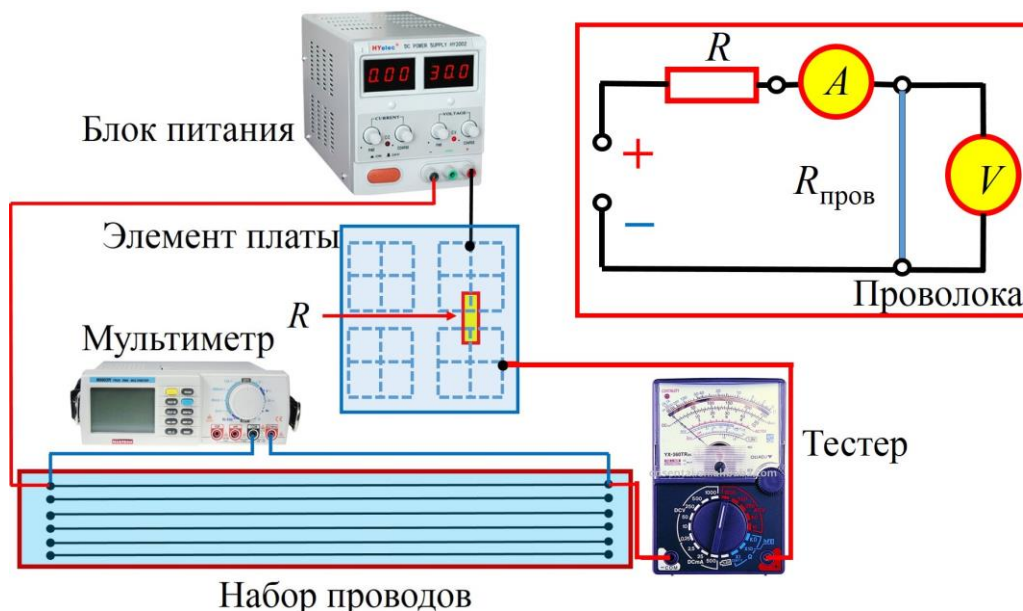


Рис. 3.12. Блок-схема соединения элементов цепи для выполнения *упр. 1*. На вставке представлена электрическая схема измерений.

Таблица 3.1

**Значения силы тока I
и напряжения U на различных проводах из константана**

$L = 0,5 \text{ м}; d = 0,15 \text{ мм}$					
$U, \text{ В}$	$\sigma_U, \text{ В}$	$I, \text{ мА}$	Диапазон измерения $I, \text{ мА}$	Цена деления $I, \text{ мА}$	$\sigma_I, \text{ мА}$
$L = 0,5 \text{ м}; d = 0,25 \text{ мм}$					
$U, \text{ В}$	$\sigma_U, \text{ В}$	$I, \text{ мА}$	Диапазон измерения $I, \text{ мА}$	Цена деления $I, \text{ мА}$	$\sigma_I, \text{ мА}$
$L = 0,5 \text{ м}; d = 0,4 \text{ мм}$					
$U, \text{ В}$	$\sigma_U, \text{ В}$	$I, \text{ мА}$	Диапазон измерения $I, \text{ мА}$	Цена деления $I, \text{ мА}$	$\sigma_I, \text{ мА}$

$L = 1,0 \text{ м}; d = 0,15 \text{ мм}$					
$U, \text{ В}$	$\sigma_U, \text{ В}$	$I, \text{ мА}$	Диапазон измерения $I, \text{ мА}$	Цена деления $I, \text{ мА}$	$\sigma_I, \text{ мА}$
$L = 1,5 \text{ м}; d = 0,15 \text{ мм}$					
$U, \text{ В}$	$\sigma_U, \text{ В}$	$I, \text{ мА}$	Диапазон измерения $I, \text{ мА}$	Цена деления $I, \text{ мА}$	$\sigma_I, \text{ мА}$

5. Напряжение на блоке питания уменьшите до «0». Разберите схему. Приборы оставьте включенными для выполнения следующих упражнений.

Обработка результатов

1. Вычислите погрешность измерения тока мультиметром YX360TRes по формуле:

$$\sigma_I = \sqrt{\left(\frac{\Delta I}{3}\right)^2 + \left(\frac{\omega}{\sqrt{12}}\right)^2}, \quad (3.14)$$

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

Результаты запишите в табл. 3.1.

2. Вычислите погрешность σ_U измерения напряжения мультиметром M9803R, используя табл. 3.2. Результаты запишите в табл. 3.1.

Таблица 3.2.

Погрешности для постоянного напряжения, измеренные мультиметром M9803R

Диапазон	$\sigma_U, \text{ мВ}$
400 мВ	$\pm(0.3\% X + 0,5)$
4 В	$\pm(0.3\% X + 2)$
40 В	$\pm(0.3\% X + 20)$
400 В	$\pm(0.3\% X + 200)$
1000В	$\pm(0.3\% X + 2000)$
X - измеренная величина.	

3. Измерения U и I являются совместными, и для обработки результатов следует использовать метод наименьших квадратов (МНК). Точность измерения U гораздо выше точности измерения I (ввиду сильного различия приборов), поэтому $I(U) = AU$, где $A = \frac{1}{R}$ (см. формулу (1)), обработку проводить в рамках линейной модели:

$$y = Ax. \quad (3.15)$$

Параметр A находится по формуле:*

$$A = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{x_i y_i}{\sigma_i^2}}{\sum_{i=1}^N \frac{x_i^2}{\sigma_i^2}}. \quad (3.16)$$

Параметр A – это величина, косвенно измеренная, выражаемая через прямо измеренные величины $\{y_i\}$ с погрешностями $\{\sigma_i\}$. Погрешность параметра A находится по формуле косвенных измерений:

$$\Delta A = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{x_i^2}{\sigma_i^2}}}. \quad (3.17)$$

4. Постройте в одних координатных осях графики полученной с помощью МНК зависимости $I(U)$ для проволоки различного диаметра. Для каждой из проволоки определите A и сопротивление $R = \frac{1}{A}$. Результаты запишите в табл. 3.3.

5. Вычислите абсолютную среднеквадратичную погрешность определения сопротивления σ_R . Результаты запишите в табл. 3.3 (погрешность

$\sigma_R = \frac{\sigma_A}{A^2}$, где σ_A – абсолютная погрешность A).

6. Рассчитайте поперечное сечение каждого из проводов по формуле

$$S_{\text{пр}} = \frac{\pi d^2}{4}.$$

Результаты запишите в табл. 3.3.

Таблица 3.3.

Рассчитанные значения сопротивления константановых проводов одной длины $L = 0,5$ м при различных значениях диаметра провода d

d , мм	R , Ом	σ_R , Ом	$S_{\text{пр}}$, мм ²	$\frac{1}{S_{\text{пр}}}, \frac{1}{\text{мм}^2}$	ρ	σ_ρ
0,15						
0,25						
0,4						

* Приведенные ниже формулы получены с учетом того, что погрешность независимой переменной x пренебрежимо мала по сравнению с погрешностью $y - \sigma_i$.

7. Постройте график зависимости сопротивления проводника R от $1/S_{\text{пр}}$.
8. Используя МНК, постройте в одних координатных осях графики зависимости $I(U)$ для проволок различной длины. Определите их сопротивление $R = \frac{1}{A}$ по формулам (3.16), (3.17). Результаты запишите в табл. 3.4.

Таблица 3.4.

Рассчитанные значения сопротивления константановых проводов одного диаметра $d = 0,15$ мм, различной длины L

L м	R , Ом	σ_R , Ом	ρ	σ_ρ
0,5				
1,0				
1,5				

9. Вычислите погрешность определения сопротивления σ_R . Результаты запишите в табл. 3.4.
10. Постройте график зависимости сопротивления проводника R от L .
11. Из формулы (3.2) следует, что удельное сопротивление равно

$$\rho_j = \frac{R_j \cdot (S_{\text{пр}})_j}{L_j}. \quad (3.18)$$

12. Вычислите по формуле (3.18) значение ρ_j для константана, используя найденные значения R_j для всех значений L_j и $(S_{\text{пр}})_j$ (всего пять значений).

13. Таким образом, получены пять значений независимых измерений удельного сопротивления константанового провода. Если теперь представить оценку ρ через полученные величины ρ_j , то значение ρ можно определить по формуле:

$$\rho = \frac{\sum_{j=1}^5 \frac{\rho_j}{\sigma_j^2}}{\sum_{j=1}^5 \frac{1}{\sigma_j^2}}, \quad (3.19)$$

где σ_j^2 – погрешность при определении ρ_j . Определите ρ .

Определите выборочное стандартное отклонение S_ρ при определении удельного сопротивления провода по формуле

$$S_p = \frac{1}{\sqrt{\sum_{j=1}^5 \frac{1}{\sigma_j^2}}} \quad (3.20)$$

14. Объясните полученные результаты.

Упражнение 2. Измерение вольтамперной характеристики нелинейного элемента

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

Измерения

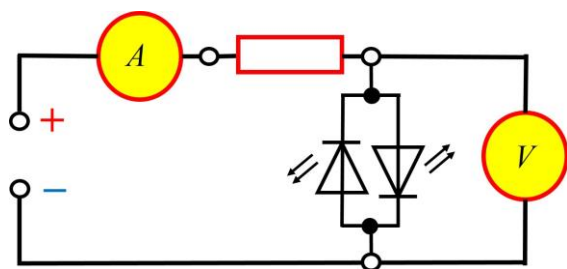


Рис. 3.13. Схема для измерения вольтамперной характеристики светодиода.

1. Соберите схему для измерения $ВАХ$ (рис. 3.13). Блок-схема соединения элементов представлена на рис. 3.14. Дополнительный резистор $R = 6,8 \text{ КОм}$, включенный последовательно со светодиодами, необходим для ограничения максимального тока и позволяет 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. В качестве амперметра используется мультиметр **YX360TRes**. Установите его в режим измерения постоянного тока с начальным пределом измерения 250 мА .

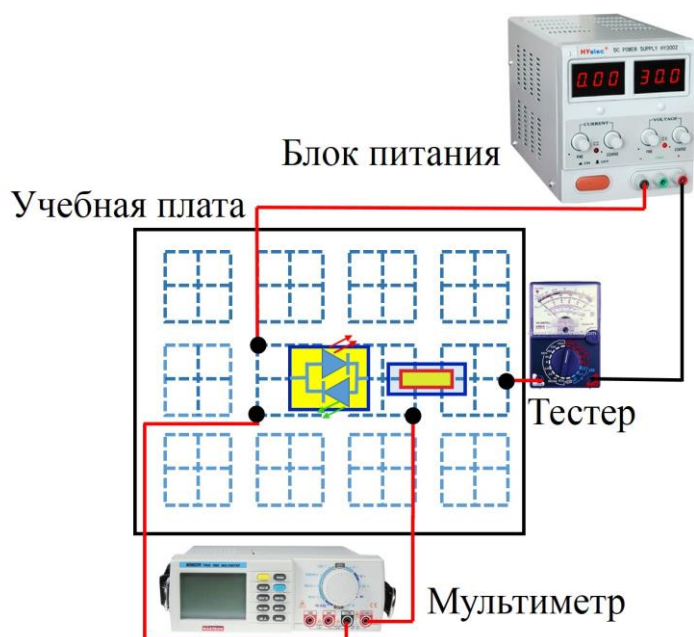


Рис. 3.14. Блок-схема соединения элементов схемы для выполнения упражнения 3.

2. После того, как преподаватель проверит

собранную схему, можно подключить блок питания Mastech. Меняя напряжение на блоке питания, измерьте ток I и напряжение U на светодиоде. Напряжение питания надо регулировать, устанавливая ток в цепи от 0 до 4 мА с шагом 0,1 - 1 мА (выбирается из условия четкого представления хода ВАХ на всех ее участках). Результаты измерений запишите в табл. 3.5.

3. Напряжение на блоке питания уменьшите до «0». Поменяйте полярность подключения источника питания, амперметра и вольтметра. Снимите ВАХ для второго диода.

Таблица 3.5.

Значения тока и напряжения для ВАХ на светодиодах

Цвет светодиода	№	U , В	σ_U , В	I , мА	Диапазон измерения I , мА	Цена деления I , мА	σ_I , мА
	1						
	2						
	...						
	7						
	1						
	2						
	...						
	7						

4. Напряжение на блоке питания уменьшите до «0». Разберите схему. Приборы оставьте включенными для выполнения следующих упражнений.

Обработка результатов

1. Определите погрешности σ_U измерения напряжений U с помощью табл. 3.2.

2. Определите погрешности σ_I измерения тока I , используя формулу (14). Результаты запишите в табл. 3.5.

3. Постройте на одном графике (в 1-й координатной четверти) зависимости $I(U)$ для светодиодов. Отметьте на кривых цвет свечения светодиодов.

Упражнение 3. Определение неизвестного нелинейного элемента по его вольтамперной характеристике

В данном упражнении определяется неизвестный нелинейный элемент по ВАХ последовательно соединенных известного линейного и неизвестного нелинейного элементов. При последовательном соединении элементов сила тока через элементы одна и та же, а напряжение, приложенное к цепи, равно сумме напряжений на элементах (см. (3.6) и (3.7), рис. 3.5).

Измерения

1. Проведите измерения $ВАХ$ (I_1 и U_1) для известного линейного элемента – резистора R . Для этого соберите схему, в соответствии с рис. 3.14а. В качестве амперметра A используйте мультиметр **YX360TRes**. Установите его в режим измерения постоянного тока с начальным пределом измерения 250 мА. Для измерения напряжения используйте мультиметр **M9803R**. После проверки собранной схемы преподавателем подключите блок питания **Mastech**. Чтобы исключить погрешность считывания по стрелочному амперметру, предлагается следующая последовательная действий: изменяя напряжение на источнике питания, добиться, чтобы стрелка аналогового амперметра совпала с риской шкалы (для каждого измерения напряжения). И для каждого значения тока I_1 измеряем U_1 (провести 7 -8 измерений). При этом приборная погрешность σ_A (равна 5% от диапазона измерения), остается. Результаты измерений запишите в табл. 3.6.

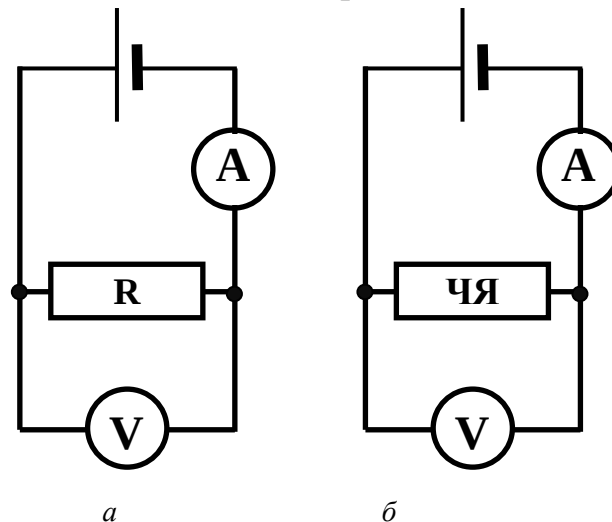
Рис. 14. Схемы для измерения $ВАХ$ неизвестного элемента.

Таблица 3.6.

Значения тока и напряжения на известном резисторе, на клеммах «черного ящика», на неизвестном элементе

№	R				«Черный ящик»		Неизвестный элемент	
	$I_1=I_2=I$, мА	σ_A , мА	U_1 , В	σ_{U_1} , В	U_2 , В	σ_{U_2} , В	U , В	σ_U , В
1								
2								
...								
8								

2. В соответствии с рис. 3.14 б соберите схему для измерения $ВАХ$ «черного ящика» (ЧЯ) (цепь, состоящая из последовательно соединенных известного линейного и неизвестного нелинейного элементов). Для тех же значений тока, что и п.1, $I_2 = I_1$, надо измерить напряжения U_2 (провести 7 - 8 измерений). Результаты измерений запишите в табл. 3.6.

3. Напряжение на блоке питания уменьшите до «0». Разберите схему. Приборы оставьте включенными для выполнения следующих упражнений.

Обработка результатов

1. С помощью табл. 3.2. Определите погрешности σ_{U_1} и σ_{U_2} измерения напряжений U_1 и U_2 . Результаты запишите в табл. 3.6.
2. Определите погрешности σ_A , учитывая, что предельная приборная погрешность равна 5% от диапазона измерения.
3. Для каждого значения тока $I = I_1 = I_2$ вычислите разность $U = U_2 - U_1$. Результаты запишите в табл. 3.6.
4. Определите погрешность σ вычислений напряжений U
 $\sigma_U = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$. Результаты запишите в табл. 3.6.
5. Постройте зависимость силы тока от напряжения для неизвестного элемента $I(U)$ с указанием погрешностей σ .
6. По полученной зависимости $I(U)$ идентифицируйте нелинейный элемент.

Упражнение 4. Проверка выполнения правил Кирхгофа*

а) Проверка выполнения первого правила Кирхгофа

Измерения

1. Соберите электрическую цепь, принципиальная схема которой представлена на рис. 3.15. В качестве амперметра А используется мультиметр YX360TRes. Установите его в режим измерения постоянного тока с начальным пределом измерения 25 мА. Выберите резисторы из представленного набора.

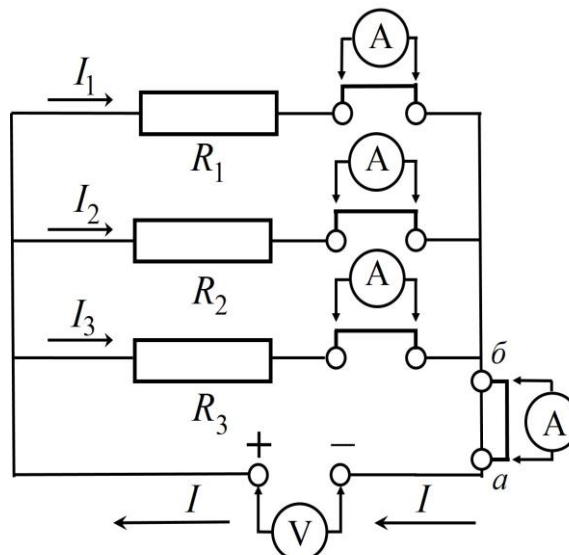


Рис. 3.15. Принципиальная схема электрической цепи для проверки первого правила Кирхгофа.

* Данное упражнение выполняется в объеме, указанном преподавателем.

2. После проверки собранной схемы преподавателем, подключите блок питания **Mastech**. Установите значение ЭДС $E = 1$ В. Измерение ЭДС проведите с помощью мультиметра **M9803R**.

3. Измерьте токи I_1 , I_2 , I_3 и I_0 (при необходимости меняя предел измерения тестера). **Измерения токов проводятся путем последовательного подключения тестера вместо перемычек на монтажной плате.** Для измерения общего тока I_0 тестер подключается к точкам *a* и *б* цепи (рис. 3.15). Результаты измерений запишите в табл. 3.7.

4. Замените одно из сопротивлений (например, R_3). Проведите измерения, как описано в п.3. Результаты измерений запишите в табл. 3.7.

Таблица 3.7.

Экспериментальные значения токов в цепи и их погрешности

Параметр	$R_1=$ $R_2=$ $R_3=$	$R_1=$ $R_2=$ $R_3=$
I_1 , мА		
Диапазон измерения I_1 , мА		
Цена деления I_1 , мА		
σ_{I_1} , мА		
I_2 , мА		
Диапазон измерения I_2 , мА		
Цена деления I_2 , мА		
σ_{I_2} , мА		

I_3 , мА		
Диапазон измерения I_3 , мА		
Цена деления I_3 , мА		
σ_{I_3} , мА		
I_0 , мА		
Диапазон измерения I_0 , мА		
Цена деления I_0 , мА		
σ_{I_0} , мА		
Δ_{I_0} , мА ($\alpha = 0,9$)		

Обработка результатов

1. Определите погрешности σ_{I_i} измерения токов I_1, I_2, I_3 и I_0 , используя формулу (3.14). Результаты запишите в табл. 3.7.

2. Определите доверительный интервал для погрешности измерения I_0

$$\Delta_{I_0} = \gamma_\alpha \cdot \sigma_{I_0},$$

где $\gamma_\alpha = \frac{1}{\sqrt{1-\alpha}}$ – коэффициент Чебышева. Проведите вычисления Δ_{I_0} для

$\alpha = 0,9$ ($\gamma_\alpha = 3,16$). Результаты расчетов запишите в табл. 3.7.

3. Используя измеренные значения токов I_1, I_2, I_3 для каждого набора сопротивлений R_1, R_2, R_3 , определите суммарный ток в цепи:

$$I_\Sigma = I_1 + I_2 + I_3.$$

Результат запишите в табл. 3.8.

Таблица 3.8.

Вычисленные значения токов в цепи и их погрешности

R	$I_\Sigma,$ мА	$\sigma_{I_\Sigma},$ мА	$\Delta_{I_\Sigma},$ мА $\alpha = 0,9$	$I_{\text{расч}},$ мА	$\sigma_{I_{\text{расч}}},$ мА	$\Delta_{I_{\text{расч}}},$ мА $\alpha = 0,9$
$R_1=$ $R_2=$ $R_3=$						
$R_1=$ $R_2=$ $R_3=$						

4. Вычислите погрешность определения I_Σ

$$\sigma_{I_\Sigma} = \sqrt{\sigma_{I_1}^2 + \sigma_{I_2}^2 + \sigma_{I_3}^2}.$$

Результаты вычисления запишите в табл. 3.8.

5. Определите доверительный интервал для погрешности измерения I_Σ

$$\Delta_{I_\Sigma} = \gamma_\alpha \cdot \sigma_{I_\Sigma}$$

для $\alpha = 0,9$. Результаты расчетов запишите в табл. 3.8.

6. Найдите общий ток в цепи $I_{\text{расч}}$, используя закон Ома:

$$I_{\text{расч}} = \frac{U}{R_{\text{общ}}},$$

или по формуле для параллельного соединения сопротивлений:

$$I_{\text{расч}} = U \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right),$$

где U – показание вольтметра, а R_1 , R_2 и R_3 – значения сопротивлений (указаны на их корпусах). Запишите результат в табл. 3.7.

7. Определите погрешность расчета $I_{\text{расч}}$. Как и в случае измерения токов, измерение напряжения выполняется один раз, поэтому определение погрешности измерений U проводится с помощью табл. 3.2.

Относительную погрешность определения сопротивлений принять равной $\delta R = 0,05$ (5%). В этом случае погрешность определения $\frac{1}{R_{\text{общ}}}$ равна

$$\sigma_{\frac{1}{R_{\text{общ}}}} = \sqrt{\left(\frac{\delta R}{R_1}\right)^2 + \left(\frac{\delta R}{R_2}\right)^2 + \left(\frac{\delta R}{R_3}\right)^2}.$$

8. Вычислите стандартное отклонение суммарной погрешности для $I_{\text{расч}}$:

$$\sigma_{I_{\text{расч}}} = \sqrt{\left(\frac{\partial I_{\text{расч}}}{\partial U}\right)^2 \cdot \sigma_U^2 + \left(\frac{\partial I_{\text{расч}}}{\partial \left(\frac{1}{R_{\text{общ}}}\right)}\right)^2 \cdot \sigma_{\frac{1}{R_{\text{общ}}}}^2}.$$

Результат запишите в табл. 3.8.

Определите доверительный интервал суммарной погрешности определения $I_{\text{расч}}$ для $\alpha = 0,9$

$$\Delta_{I_{\text{расч}}} = \gamma_{\alpha} \cdot \sigma_{I_{\text{расч}}}.$$

Результаты запишите в табл. 3.8.

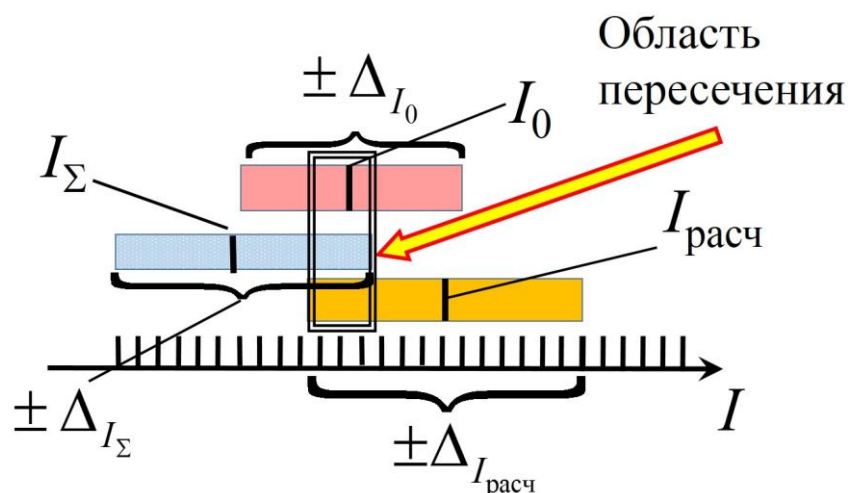


Рис. 16. Схематическое представление справедливости первого правила Кирхгофа.

9. Проведите сравнение экспериментально определенных значений I_{Σ} , I_0 и рассчитанных значений $I_{\text{расч}}$. Для большей наглядности имеет смысл представить результаты графически с использованием линейной шкалы (рис. 3.16), отмечая на ней значения I_{Σ} , I_0 и $I_{\text{расч}}$ и соответствующие доверительные интервалы для суммарной погрешности ($\Delta_{I_{\Sigma}}$, Δ_{I_0} , $\Delta_{I_{\text{расч}}}$).

На рис. 3.16 интервалы $I_{\Sigma} \pm \Delta_{I_{\Sigma}}$, $I_0 \pm \Delta_{I_0}$ и $I_{\text{расч}} \pm \Delta_{I_{\text{расч}}}$ отмечены различной штриховкой. Наличие пересечения этих интервалов указывает на точность выполнения первого правила Кирхгофа.

б) Проверка второго правила Кирхгофа

Измерения

1. Соберите электрическую цепь, принципиальная схема которой представлена на рис. 3.17. В качестве вольтметра V используется мультиметр **M9803R**. Используйте те же резисторы, что при проверке первого правила Кирхгофа (один из вариантов).

2. Включите блок питания. Установите значение ЭДС порядка $E = 10$ В. Измерение ЭДС проведите с помощью вольтметра. Результат измерения U_E запишите в табл. 3.9.

3. Измерьте падения напряжения U_1 , U_2 , U_3 на сопротивлениях (меняя при необходимости предел измерения вольтметра). Результаты измерений запишите в табл. 3.9.

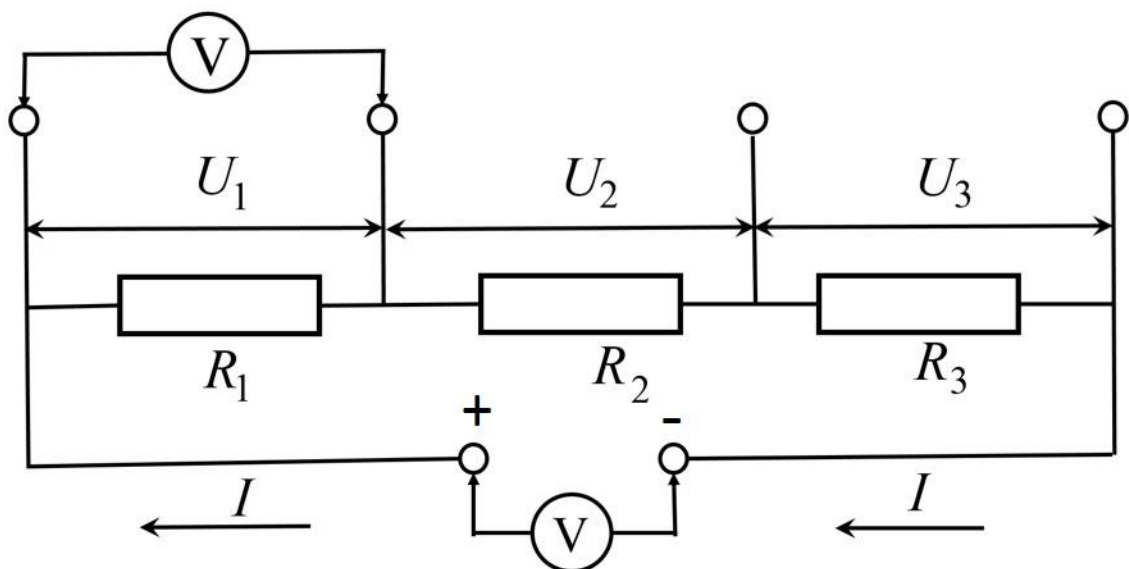


Рис. 3.17. Принципиальная схема электрической цепи для проверки второго правила Кирхгофа.

Таблица 3.9.

**Экспериментальные и расчетные значения напряжений
в цепи и их погрешности**

Параметр	$R_1=$ $R_2=$ $R_3=$
$U_1, \text{ В}$	
Диапазон измерения $U_1, \text{ В}$	
$\sigma_{U_1}, \text{ В}$	
$U_2, \text{ В}$	
Диапазон измерения $U_2, \text{ В}$	
$\sigma_{U_2}, \text{ В}$	
$U_3, \text{ В}$	
Диапазон измерения $U_3, \text{ В}$	
$\sigma_{U_3}, \text{ В}$	
$U_E, \text{ В}$	
Диапазон измерения $U_E, \text{ В}$	
$\sigma_{U_E}, \text{ В}$	
$\Delta_{U_E}, \text{ В}$ $\alpha = 0,9$	
$U_\Sigma, \text{ В}$	
$\sigma_{U_\Sigma}, \text{ В}$	
$\Delta_{U_\Sigma}, \text{ В}$ $\alpha = 0,9$	

Обработка результатов

1. Определите суммарное падение напряжения U_Σ на сопротивлениях, используя измеренные значения напряжений U_1, U_2, U_3 :

$$U_\Sigma = U_1 + U_2 + U_3.$$

Определите погрешности σ_{U_i} измерения напряжений U_1, U_2, U_3 и U_Σ с помощью табл. 3.2.

2. Определите доверительный интервал для суммарной погрешности измерения ЭДС при $\alpha = 0,9$:

$$\Delta_{U_E} = \gamma_\alpha \cdot \sigma_{U_E}.$$

3. Вычислите погрешность определения U_Σ

$$\sigma_{U_\Sigma} = \sqrt{\sigma_{U_1}^2 + \sigma_{U_2}^2 + \sigma_{U_3}^2}.$$

4. Определите доверительный интервал для суммарной погрешности

$$\Delta_{U_\Sigma} = \gamma_\alpha \cdot \sigma_{U_\Sigma},$$

Результаты вычисления запишите в табл. 3.9.

5. Проведите сравнение экспериментально определенных значений U_Σ и U_E . Для наглядности результаты представляют графически с использованием линейной шкалы (рис. 3.18), отмечая на ней значения U_Σ и U_E и соответствующие доверительные интервалы для суммарной погрешности (Δ_{U_Σ} , Δ_{U_E}).

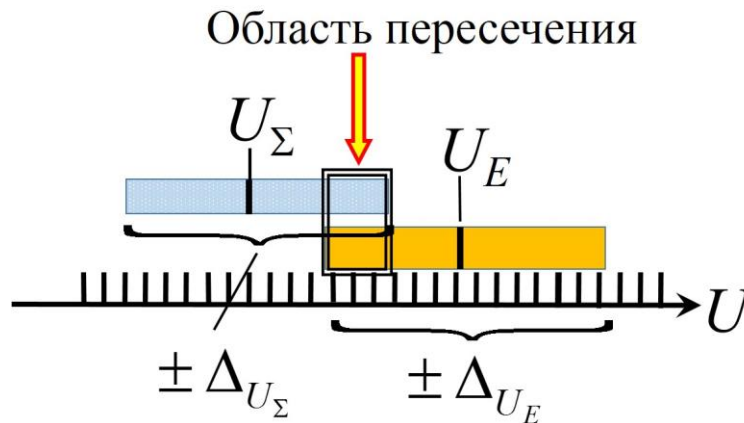


Рис. 3.18. Схематическое представление справедливости второго правила Кирхгофа.

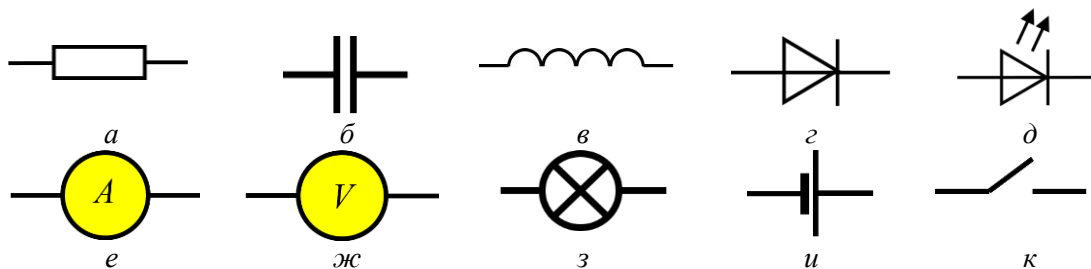
На рис. 3.18 области $U_\Sigma \pm \Delta_{U_\Sigma}$ и $U_E \pm \Delta_{U_E}$ имеют различную штриховку. Наличие пересечения этих областей указывает на *выполнение второго правила Кирхгофа*.

Основные итоги работы

В результате выполнения лабораторной работы должны быть освоены методы измерения тока и напряжения в цепях постоянного тока, методы расчета приборных погрешностей, проведена экспериментальная проверка выполнения правил Кирхгофа, экспериментально исследованы вольтамперные характеристики различных элементов.

Контрольные вопросы

1. Назовите элементы электрических цепей:



- Укажите все возможные контуры для схемы на рис. 3.15. Запишите второе правило Кирхгофа для всех контуров.
- Нарисуйте все возможные контуры для схем на рис. 3.17, считая, что все приборы реальные (имеют определенное внутреннее сопротивление). Запишите второе правило Кирхгофа для всех этих контуров.
- Нарисуйте схему подключения шунта к амперметру (добавьте шунт к схеме на рис. 3.7). Если сопротивление амперметра 50 Ом, то какой шунт надо подключить, чтобы увеличить диапазон измерений силы тока в 10 раз. Каким стало сопротивление амперметра с шунтом?
- Проведите полные выкладки для формул расчета углового коэффициента (и его погрешности) для прямой $y = Ax$ методом МНК. Что такое коэффициент корреляции?
- По какой из схем рис. 3.9 проводятся измерения в *упр. 1*? Почему?
- Для какой части вольтамперной характеристики диода вольтметр и амперметр лучше подключать по варианту на рис. 3.9а и на рис. 3.9б?

Литература

- Сквайрс Дж. Практическая физика//Пер. с англ. М.: Мир, 1971. 246с.
- Митин И.В., Русаков В.С. Анализ и обработка экспериментальных данных. М.: Физический факультет МГУ, 2012, 43с.