



КАФЕДРА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

Практикум

ВВЕДЕНИЕ В ТЕХНИКУ ЭКСПЕРИМЕНТА

Лабораторная работа 2

ИЗМЕРЕНИЕ СИЛЫ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ В ЦЕПЯХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Составители Киров С.А., Ананьева Н.Г.

2014

Измерение силы тока и напряжения в цепях постоянного тока.

Лабораторная работа 2 (практикум “Введение в технику эксперимента”).

Учебное пособие / Составители Н.Г. Ананьева, С.А. Киров. – М.: ООП Физ. фак-та МГУ, 2014. 17 с.

Каждый студент, обучающийся на физическом факультете, должен уметь измерять силу тока и напряжение в электрических цепях. В описании приведены принципы работы вольтметров и амперметров, многофункциональных мультиметров, порядок подготовки приборов к работе и методика измерения напряжения и силы тока.

В задаче проводятся измерения напряжения и силы постоянного тока, рассчитываются сопротивления резисторов цепи. Снимаются вольтамперные характеристики на линейном (резисторе) и нелинейном (светодиоде) элементах цепи.

Поскольку эта задача – одна из первых выполняемых задач практикума, большое внимание уделяется обработке результатов измерений, расчёту неопределенностей приборных и совместных измерений – методу наименьших квадратов (МНК).

Пособие предназначено для студентов физического факультета МГУ и для преподавателей, ведущих занятия в практикуме. Излагаемый материал может быть использован для подготовки к выполнению задач общего физического практикума.

Цель задачи –

1. Знакомство с обработкой результатов измерений.
2. Освоение навыков работы с амперметрами и вольтметрами, мультиметрами:
 - подготовка приборов к работе,
 - подключение приборов в цепь, снятие показаний,
 - расчёт приборных погрешностей измерений.

Введение

Основные формулы оценки погрешностей измерений

Поскольку эта задача – одна из первых выполняемых задач практикума, познакомимся с некоторыми основными понятиями, необходимыми при обработке результатов измерений: **измерения и неопределенности измерений**. Для начального знакомства мы не будем давать строгих определений, а ограничимся обсуждением смысла самих понятий и примерами. Сами определения можно найти, например, в книге И.В. Митина, В.С. Русакова. «Анализ и обработка экспериментальных данных» (2012г. Изд. МГУ).

Измерения могут быть **прямые** и **косвенные**. *Измерения считают прямыми, когда мы непосредственно с прибора считываем показания.* Например, определяем время забега спортсмена на дистанции 1000 метров, запустив секундомер на старте и остановив на финише. Если для этих же целей мы используем обычные часы с секундной стрелкой, мы вычисляем время забега: время финиша минус время старта. Вычисленное время забега будет косвенным измерением. *Если с прямыми измерениями надо провести какие-либо математические операции для получения необходимого нам результата, то результат вычислений является косвенным измерением.*

Прямые измерения.

Результат измерения есть случайная величина, т.е. заранее непредсказуема – меняется от опыта к опыту. Это – одна из аксиом метрологии. Причин расхождения показаний от измерения к измерению может быть много:

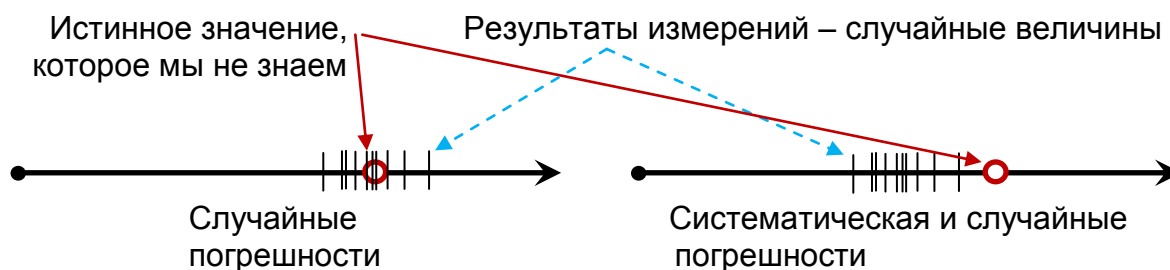
- Сама измеряемая величина не имеет четких границ или изменяется со временем (например, рост человека; расстояние, освещаемое автомобильной фарой).
- Используемая нами модель измеряемого объекта может отличаться от действительности: например, мы хотим измерить диаметр мяча, а мяч не идеально круглый.

- При считывания показаний с приборов мы ограничены количеством цифр на цифровом индикаторе или числом делений в аналоговых приборах.
- Измерительные приборы не идеальны. Например, линейка может быть длиннее или короче эталонной.
- Условия проведения эксперимента влияют на результат измерения. Например, если мы измерим диаметр резинового мячика штангенциркулем зимой на улице и в комнате, результаты будут отличаться. А с какой силой прижимаем штангенциркуль к мячу? (мяч не деформируется?)
- ...

Для оценки «неточностей» измерений используется понятие **неопределенность измерений (погрешность или ошибка измерений)**.

Теория вероятности и математическая статистика (ТВМС) дает математические формулы обработки погрешностей измерений. На физическом факультете ТВМС изучается на 3 курсе. Пока приведем формулы для обработки результатов измерений без выводов.

Погрешности измерений принято делить на **случайные** и **систематические** [2, стр.7]. На рисунке проиллюстрированы результаты измерений со случайными и систематическими погрешностями.



Случайные погрешности.

Случайные величины потому и названы случайными, что мы не можем заранее знать, каков будет следующий результат. Однако, как правило, случайные величины принимают значения в некотором интервале величин. Кроме того, какие-то значения более предпочтительны, чем другие. То есть, величины случайные, но есть некоторые тенденции их поведения.

*Возьмем, например, игральную кость (кубик): при каждой броске у нас будет выпасть число от 1 до 6 с равной **вероятностью**. А если у кубика смещен центр тяжести, то какие-то значения будут выпадать чаще.*

Математики описывают поведение случайной величины при помощи **функции плотности вероятности**. Наиболее известные (чаще

встречающиеся): распределение Гаусса и равномерное распределение функции плотности вероятности.

При анализе случайной величины сначала необходимо определить ее функцию распределения плотности вероятности, и далее, в зависимости от этой функции, проводить обработку результатов. *В практикумах мы будем предполагать, что выполненные нами измерения имеют Гауссово распределение функции плотности вероятности*, поэтому обрабатываем результаты по приведенной ниже схеме.

Прямые измерения, проведенные в одинаковых условиях. Оценка случайной погрешности.

Если бы мы провели бесконечно много измерений, мы бы получили полный набор всех значений, которые может принимать случайная величина. Реально количество измерений конечно, то есть мы получаем **выборку** – конечное число значений: $\{x_i\} = \{x_1, x_2, x_3 \dots x_N\}$.

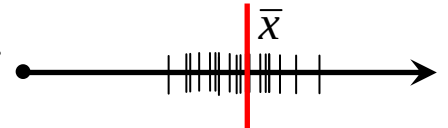
Проведем измерения какой-либо физической величины в однотипных условиях N раз. Получим случайную выборку: $\{x_i\} = \{x_1, x_2, x_3 \dots x_N\}$.



Обработка:

Наилучшей оценкой истинного значения измеряемой физической величины

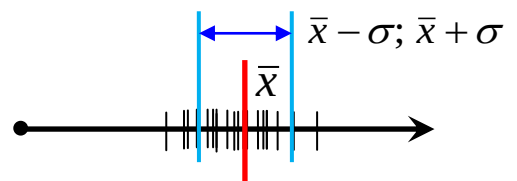
является *среднее арифметическое* $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$.



Разброс $\{x_i\}$ вокруг среднего значения $\bar{x}$ характеризуется **выборочным стандартным отклонением случайной величины** $\{x_i\}$ (*среднеквадратичной погрешностью*)

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}.$$

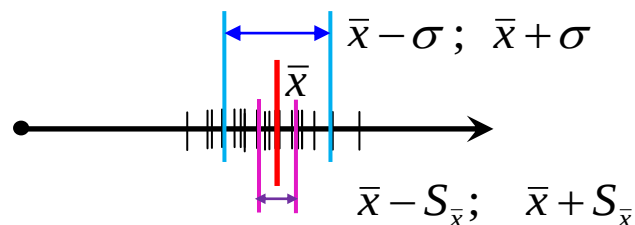
При $N \rightarrow \infty$ выборочное стандартное отклонение S_x стремится к постоянной величине σ , называемой **стандартным отклонением**, квадрат которой σ^2 называется **дисперсией**. С точки зрения теории вероятности смысл величины σ таков: результат каждого измерения с некоторой вероятностью будут находиться в интервале $(\bar{x} - \sigma; \bar{x} + \sigma)$. В случае, когда у нас Гауссово распределение функции плотности вероятности случайных величин (измерений), результат каждого измерения попадает в этот интервал с вероятностью примерно 70%.



Если бы мы провели бесконечное число измерений, то получили бы истинное среднее значение и среднеквадратичное отклонение. Но число измерений всегда конечно: это выборка из всех бесконечных возможностей. Если мы проведем несколько серий по N измерений, то средние значения измерений в каждой серии могут быть разными. Разброс среднего арифметического $\bar{x}$ характеризуется

стандартным отклонением среднего арифметического (не путать с S_x !):

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{N}} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$



Истинное значение средней величины (которое мы получили бы при бесконечном числе измерений) находится в интервале $(\bar{x} - S_{\bar{x}}; \bar{x} + S_{\bar{x}})$ с вероятностью примерно 70% (для Гауссова распределения функции плотности вероятности). Если необходимо узнать результат с большей или меньшей вероятностью, то надо умножить σ на коэффициент Стьюдента (см. [2], стр. 42).

Формулы для оценки случайных погрешностей измерений должны применяться для достаточно большого числа измерений (10 – 100 и более), иначе можно получить слишком большие отклонения от истинных значений (3 – 5 измерений – это еще не статистика).

Косвенные измерения

Если использовать математическую терминологию, то результат косвенных измерений – это функция n переменных, где переменные – это прямо измеренные величины: $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, где $x_i = \bar{x}_i \pm \sigma_{\bar{x}_i}$ ($i = 1 \dots n$) – результаты прямых измерений n независимых величин, $\sigma_{\bar{x}_i}$ – погрешности средних значений прямых измерений.

Например, скорость движения велосипедиста по кольцевому треку: $v = S / t$. Скорость – это функция двух переменных S и t , непосредственно измеренных.

Мы несколько раз измеряем время прохождения полного кольца, считаем среднее время и погрешность среднего. Длину трека измерили с погрешностью σ_S .

В качестве наилучшего значения средней величины косвенных измерений $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ принимается значение функции y от средних значений результатов прямых измерений $\bar{y} = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n)$.

Для расчета стандартного отклонения нам потребуется рассчитывать частные производные от функции многих переменных.

$\frac{\partial f}{\partial x_i}$ – частная производная функции f , по i -той переменной, считаем ее как обычную производную по x_i , остальные переменные считаем константами, равными средним значениям.

Стандартное отклонение рассчитываем по формуле:

$$\sigma_{\bar{y}} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \bigg|_{\substack{x_1=\bar{x}_1 \\ \dots \\ x_n=\bar{x}_n}} \cdot \sigma_{x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \bigg|_{\substack{x_1=\bar{x}_1 \\ \dots \\ x_n=\bar{x}_n}} \cdot \sigma_{x_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} \bigg|_{\substack{x_1=\bar{x}_1 \\ \dots \\ x_n=\bar{x}_n}} \cdot \sigma_{x_n} \right)^2}$$

или

$$\sigma_{\bar{y}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \bigg|_{\substack{x_1=\bar{x}_1 \\ \dots \\ x_n=\bar{x}_n}} \right)^2 \cdot \sigma_{x_i}^2 \right]}$$

Считаем частные производные для примера $v = S / t$: $\frac{\partial v}{\partial S} = \frac{1}{t}$, $\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{S}{t^2}$

Погрешность среднего значения скорости

$$\sigma_{\bar{v}} = \sqrt{\frac{1}{t^2} \sigma_{\bar{S}}^2 + \left(\frac{\bar{S}}{t^2} \sigma_{\bar{t}} \right)^2}$$

Приборные погрешности.

Приборы бывают **аналоговые** (стрелочные) и **цифровые**. С цифровых приборов проще считывать показания, но когда необходимо следить за несколькими измеряемыми величинами и не требуется высокая точность измерений, используют стрелочные приборы. Например, в современных автомобилях на приборной панели есть и стрелочные, и цифровые индикаторы.

В зависимости от принципа действия прибора погрешности измерения могут рассчитываться:

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

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

Приборные погрешности обусловлены:

- принципиальной невозможностью абсолютно точно измерить – это неустранимо;
- разными условиями проведения измерений (температура, влажность, и т.д.) – в инструкции к прибору указывают необходимые условия – их надо 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 партии приборов всей партии присваивают *класс точности* (см. ниже). В этой партии будут попадаться приборы и более точные, и более грубые. Причем основную погрешность будет вносить систематическая составляющая именно из-за разброса параметров деталей.



На фотографии приведен пример разброса показаний амперметров, соединенных последовательно и, следовательно, измеряющих один и тот же ток.

Погрешности при измерениях стрелочными приборами

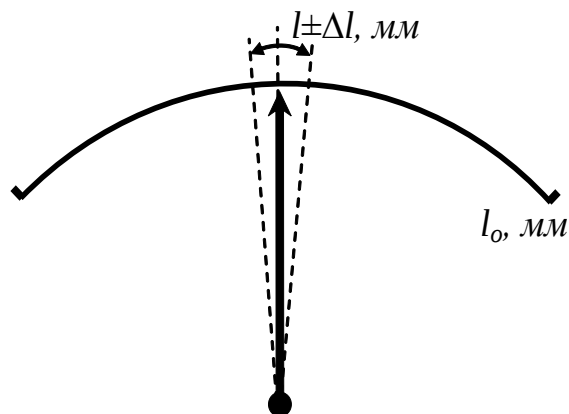
Погрешности считывания: $\sigma_{\text{счит}} \approx \Delta x / 3$, где Δx – цена наименьшего деления шкалы в окрестности точки измерения.

Приборные погрешности обусловлены погрешностями работы измерительного механизма прибора (напр. из-за трения, неточности градуировки, влияния внешних факторов и т.д.).

Для большинства стрелочных приборов приборная погрешность зависит только от диапазона измерения и характеризуется классом точности прибора k . Класс точности k бывает $k = 4; 2,5; 1; 0,5$ и т.д., он указан в паспорте прибора. По классу точности мы вычисляем приборную погрешность:

$$\Delta l = \frac{k}{100\%} l_0,$$

где 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, они независимы. Тогда общая погрешность – стандартное отклонение – находится суммированием дисперсий отдельных погрешностей (например, для погрешностей случайных, приборных, считывания по шкалам, округления и т.д.)

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{S_{\text{случ}}^2 + \sigma_{\text{прибор}}^2 + \sigma_{\text{счит}}^2 + \sigma_{\text{окр}}^2 + \dots}$$

На практике чаще всего бывает, что какие-то погрешности значительно меньше других – на порядок (в 10 раз) и более. Тогда ими можно пренебречь.

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

В задаче 35 (ВТЭК), проводя измерения напряжения (на автоматизированных установках) 5, 10, ..., 1000 раз, надо будет определить, а сколько измерений имеет смысл проводить.

Округление результата.

При окончательной записи результата необходимо провести округление полученных чисел.

В правилах округления фигурирует понятие «значащая цифра». **Значащие цифры:** все цифры от первой слева, не равной «0», до последней справа.

Примеры: 123,5 – четыре значащие цифры;
0,0023 – две значащие цифры;
1200 – четыре значащие цифры;
1000,00 – шесть значащих цифр.

Правила округления (более подробно см. [2], стр. 39 – 41).

- Сначала округляют погрешность – до одной, двух **значащих цифр**.
- После этого округляют результат так, чтобы последняя значащая цифра результата соответствовала последней значащей цифре погрешности.

Рассмотрим примеры:

$123,468 \pm 1,5678$ – начинаем округлять с погрешности: в погрешности оставляем две значащие цифры, если первая «1» или «2»; во всех остальных случаях в погрешности оставляем одну значащую цифру. В приведенном примере: $\pm 1,6$. *Смысл округления в том, чтобы убрать бесполезную информацию: если у нас результат с некоторой вероятностью может принимать значения от 121,9 до 125,1, то сомнительной будет уже третья значащая цифра. А нужны ли нам тогда пятая и последующие значащие цифры?* Округляем результат, получим: $123,5 \pm 1,6$.

$$1,00056 \pm 0,08231 \rightarrow 1,00 \pm 0,08$$

$12895 \pm 786 \rightarrow \cancel{12900 \pm 800}$ – неправильно! Мы оставили в погрешности три значащих цифры. Вынесем множитель 10^n . Причем общепринято, чтобы n было кратно 3 (у нас и приставки к единицам измерения величин кратны 10^3 : **кило**метры, **милли**амперы и т.д.) $\rightarrow (12,9 \pm 0,8) 10^3$. У погрешности и результата должен быть один и тот же множитель.

При проведении расчетов косвенных измерений имеет смысл оставлять 2-3 значащие цифры в погрешности прямых измерений (и соответственно округлять результат): с запасом, чтобы расчеты не вносили дополнительные погрешности. Конечный итог представить по приведенным выше правилам.

Измерение силы тока и напряжения. Общие сведения.

Для измерения силы тока применяют приборы, называемые **амперметрами**. В основе их работы лежит однозначная зависимость угла поворота стрелки индикатора, соединенной с подвижным узлом, от величины силы

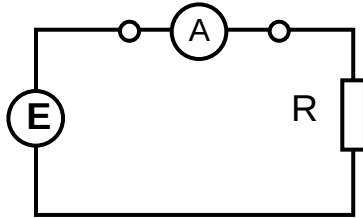


Рис. 1. Подключение амперметра в исследуемую цепь: **Е**- ЭДС, действующая в цепи, **R** - сопротивление цепи.

тока, протекающего через измерительный узел прибора [1]. Амперметры включают последовательно в разрыв цепи в том ее участке, где необходимо определить силу тока (**рис. 1**). Шкалы амперметров обычно градуируют непосредственно в единицах силы тока: амперах (А или mA, μ A).

Чем меньше внутреннее сопротивление амперметра, тем меньшее изменение тока в цепи вызовет его включение. Поэтому для измерений силы тока амперметром должно выполняться условие: $r_A \ll R$, где r_A – внутреннее сопротивление прибора. Для расширения пределов измерений параллельно амперметру подключают резисторы, сопротивление которых меньше внутреннего сопротивления прибора. Их называют шунтами. Сопротивление шунта определяется из соотношения

$$r_{ш} = \frac{r_A}{n - 1}$$

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.

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

При измерении 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, против которой указаны символы "—" и "А" (или "mA", " μ A"). Во избежание выхода из строя прибора необходимо следить за полярностью его подключения в цепь. Входную клемму прибора, обозначаемую символами

"*", "-" или "общ", "сом", подключают к той точке разрыва цепи, которая имеет меньший потенциал, относительно другой точки, подключаемой к входной клемме, обозначаемой символами "+" или "А".

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 слишком малый угол, то необходимо перейти на меньший предел, предварительно отключив прибор из цепи. Оптимальным можно считать выбор такого предела измерений, при котором стрелка индикатора в процессе измерения будет располагаться по центру или в правой части шкалы (но не зашкаливает!).

Для измерения напряжения на участке цепи (разности потенциалов между точками, ограничивающими исследуемый участок), применяют приборы - **вольтметры**, подключаемые параллельно исследуемому участку (*рис. 2*). Фактически аналоговый вольт-

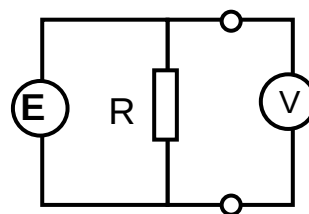


Рис. 2. Подключение вольтметра:
E - ЭДС, **R** - сопротивление, на котором измеряется напряжение.

метр (кроме приборов некоторых систем, например, электростатической) представляет собой амперметр, 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 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, следовательно, к заметному изменению измеряемой разности потенциалов.

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

$$r_d = (n-1)r_v$$

где n – число, определяющее во сколько раз требуется увеличить предел измерений. Размещение нескольких добавочных сопротивлений и переключателя, позволяющего их подключать к индикатору, внутри корпуса прибора, дает возможность конструировать многопредельные вольтметры. На их лицевых панелях рядом с переключателем пределов измерений ука-

зывают *максимальные значения разности потенциалов*, которые могут быть измерены при том или ином положении переключателя.

При выполнении измерений в целях постоянного тока следует, так же как и при измерениях силы тока, соблюдать полярность подключения прибора к цепи. 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.

Большой точности измерения напряжения можно достичь, если воспользоваться электронно-цифровыми вольтметрами. Их внутреннее сопротивление, как правило, значительно превышает внутреннее сопротивление стрелочных 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 переключатель режимов работы необходимо установить в положение "контроль нуля" (иногда оно обозначается символом ">0<") и **замкнуть накоротко входные клеммы прибора**. При необходимости регулировка нулевого положения стрелки или установка нулевого значения на индикаторе осуществляется вращением ручки переменного резистора, рядом с которым на лицевой панели указывают "установка нуля" или ">0<".

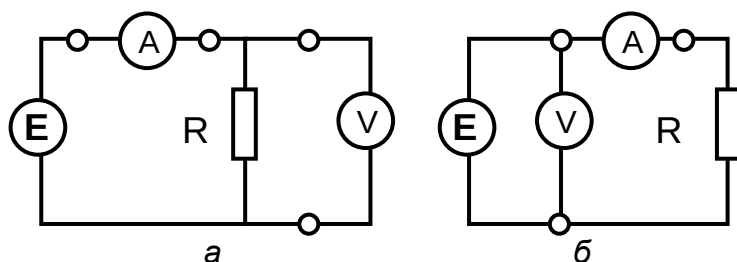


Рис. 3. Два варианта схем включения приборов при одновременном измерении силы тока и напряжения

ление вольтметра r_v значительно превышает сопротивление участка цепи R , а вторым (б) — когда внутреннее сопротивление амперметра r_A значительно меньше величин R (объясните, почему).

При выполнении одновременных измерений силы тока и напряжения в цепи возможны два варианта подключения приборов, представленные на **рис.3**. Вариантом (а)

можно пользоваться, ко-

гда внутреннее сопротив-

ление вольтметра r_v значительно превышает сопротивление участка цепи R , а вторым (б) — когда внутреннее сопротивление амперметра r_A значительно меньше величин R (объясните, почему).

Практическая часть

При выполнении задачи используются различные электроизмерительные приборы. Их описания и инструкции по эксплуатации выдаются перед

работой. **Перед началом измерений все приборы нужно подготовить к работе согласно их инструкциям.**

Главная операция при подготовке прибора к работе – проверка и установка нуля:

- а) механическая (для стрелочных приборов) – до включения прибора необходимо проверить нулевое положение стрелки,
- б) электрическая – провести до начала измерений после прогрева приборов (прогрев занимает обычно около 10 – 15 минут – см. паспорт прибора). При переключении диапазонов измерений нулевое положение стрелки может нарушаться – проверяйте «0» на каждом диапазоне измерений!

Упражнение 1. Измерение напряжения и силы тока в различных участках цепи.

Необходимо выполнить ряд измерений напряжения и силы тока в цепи постоянного тока. Цепь состоит из резисторов, размещенных на учебной плате (*рис.4*), которые образуют разветвленную цепь. Установленные на плате кнопки в нормальном положении **замкнуты**. При нажатии они **размыкают** соответствующий участок цепи. Подключив параллельно кнопке амперметр, и нажав на кнопку, мы можем измерить силу тока.

Гнезда для подключения приборов. Подсоединяем к этим гнездам амперметр для измерения тока на резисторах R1, R2, R5, нажимаем на кнопку, снимаем показания.

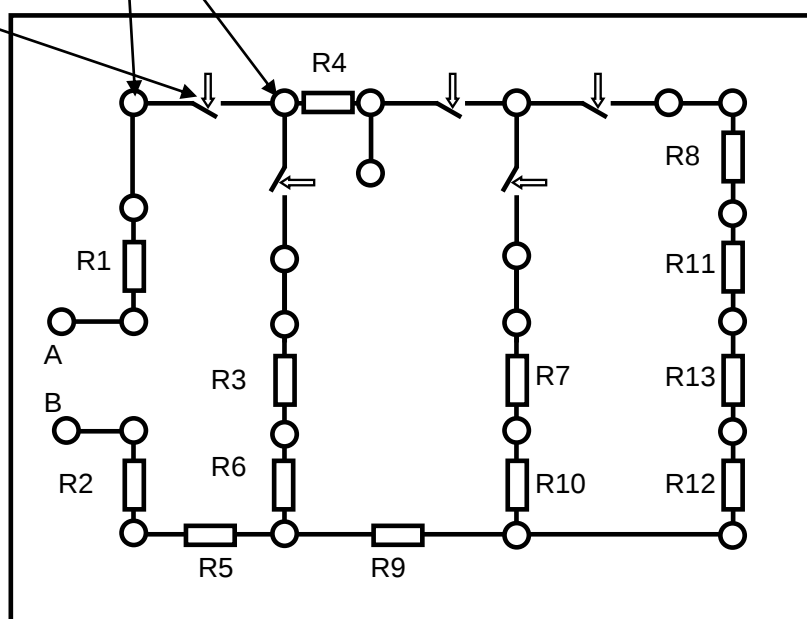


Рис. 4. Схема блока резисторов.

Измерения проводятся для резисторов, номера которых задаются преподавателем (3 - 5 резисторов).

Вольтметр и амперметр к измеряемому резистору нужно подключить **одновременно** согласно варианту, показанному на **рис. 3а**.

Все результаты измерений следует оформить в виде таблицы. Для усвоения навыков определения погрешностей в таблицу надо занести и диапазон, на котором проводилось измерения (в других задачах этого, как правило, делать не надо).

При домашней подготовке надо законспектировать «Основные формулы оценки погрешностей измерений», «Измерение силы тока и напряжения. Общие сведения».

В конспекте к 1 упражнению обязательно должны быть:

1. название упражнения,
2. схема блока резисторов,
3. заготовка для записи используемых в задаче приборов:
 Вольтметр (мультиметр M9803R или вольтметр ВК7-9...)
 Амперметр (мультиметр DT830B или YX360NR ...)
 Источник питания УИП
4. заготовка для записи результатов: таблица 1.
5. Оставить свободное место для расчетов сопротивлений резисторов и погрешностей.

Подготовить конспекты следующих упражнений.

Таблица 1. Измерение силы тока и напряжения на заданных резисторах, расчет их сопротивлений.

Плата № Напряжение питания $U = \dots$.

№ R	U, В	Диап. U, В	ΔU , В			U_2 , В	I , mA	Диап. I, mA	ΔI , mA			R, Ом	ΔR , Ом
			счит.	приб.	общая				счит.	приб.	общая		

Практическая работа.

1. Включить вольтметр тумблером «сеть». Согласно описанию дать ему прогреться. Поскольку в задаче используются универсальные вольтметры или мультиметры, выбрать род работы прибора для измерения постоянного напряжения; проверить и выставить «0». Переключить диапазон напряжений на значение, не меньше 30 В.

2. В задаче используется источник постоянного тока, напряжение которого можно установить в пределах 1÷25 В. **Прежде, чем включать источник питания, надо:**
 - проверить ручки регулировки выходного напряжения. Они должны быть установлены в «0» положение (повернуты против часовой стрелки до упора), соответствующее минимуму выходного напряжения.
 - Клеммы **А** и **В** платы (*рис.4*) подключить соединительными проводами к источнику тока. Для того чтобы было проще соблюдать полярность подключения, удобно использовать соединительные провода разного цвета: красные провода подсоединять к «+» источника питания и измерительных приборов, а синие (или зеленые) – к «-».
 - Для проверки правильности установки напряжения подключить к клеммам А-В вольтметр (проверить, что диапазон напряжений не меньше 30 В).
3. После этого **источник включить**. Установить заданное напряжение (10 – 15 В) по шкале источника питания, проверить и поправить установленное значение по вольтметру. **Все измерения данного упражнения необходимо выполнить для одного напряжения источника, заданного преподавателем, которое нужно записать.**
4. Вольтметр отсоединить от клемм А-В и подключить параллельно заданному резистору. Считайте показания с вольтметра. *Если они малы, и не превышают значения следующего, более чувствительного диапазона измерения, переключите вольтметр на этот диапазон.* Повторяйте действия, описанные между *_*, пока показания не станут по величине больше, чем значение следующего диапазона! **Считайте и запишите в таблицу показания вольтметра U.**
5. Для измерения силы тока в последовательном участке цепи нужно подключить амперметр параллельно кнопке, размыкающую данную цепь, и нажать на кнопку. Амперметр не обязательно подключать рядом с измеряемым резистором, он может быть в любом месте последовательной цепи, в которую входит данный резистор.
Во избежание выхода из строя прибора необходимо внимательно следить за выбором пределов измерений. Начинать измерения нужно с самого грубого диапазона. А для стрелочного прибора необходимо следить и за соблюдением полярности его подключения.
6. **Проверьте, что на амперметре выставлен самый грубый диапазон.** Нажмите кнопку для подключения амперметра. Считайте показания с прибора. *Если они малы и не превышают значения следующего диапазона измерения, переключите амперметр на этот диапазон.* При переключении диапазонов кнопку необходимо отпустить! Повторяйте

действия, описанные между **, пока показания не станут по величине больше, чем значение следующего диапазона. **Снимите и запишите в таблицу показания с амперметра.**

7. Поскольку используемый в задаче амперметр имеет сопротивление, сравнимое с сопротивлением некоторых резисторов, его подключение может заметно изменить распределение токов и напряжений на элементах платы, и результаты измерений напряжения могут измениться при подключении амперметра (нажатие на кнопку).

Считайте еще раз показания вольтметра, теперь при нажатой кнопке, к которой подключен амперметр, и запишите их в таблицу в графу U_2 (погрешности второй раз можно не считать, если не изменялся диапазон измерений вольтметра).

Каждое измерение выполняют один раз и определяют погрешность измерения, учитывая класс точности прибора и погрешность считывания. Если диапазон измерения выбран правильно, погрешность считывания должна быть меньше (или даже много меньше) приборной погрешности. Погрешность считывания есть и у цифровых приборов: $\frac{1}{2}$ единицы последнего разряда индикатора.

Приборные погрешности определяются сразу – во время проведения измерений!

По измеренным значениям напряжения и силы тока рассчитайте сопротивления заданных резисторов с оценкой погрешностей. Какое значение напряжения (U или U_2) надо взять для правильных расчетов сопротивлений?

Упражнение 2. Измерение вольтамперной характеристики резистора для расчета его сопротивления.

Вольтамперной характеристикой (BAX) элемента называется зависимость тока от напряжения или напряжения от тока на данном элементе.

Для резистора вольтамперная характеристика – прямая линия, по углу наклона которой можно определить сопротивление резистора.

Рассчитывая значение сопротивления резистора по измерениям силы тока и напряжения, мы ограничены точностью приборов. Чтобы улучшить точность результата, используя те же приборы, можно провести совместные измерения (силы тока и напряжения) при разных напряжениях питания в цепи и рассчитать сопротивление, используя **Метод Наименьших Квадратов – МНК** [2].

Собрать схему для одновременного измерения силы тока и напряжения для одного из резисторов из упражнения 1 (резистор задает преподаватель).

Регулируя напряжение питания от 0 до 20 В снять 10 - 12 точек зависимости силы тока от напряжения на резисторе. Занести в таблицу измеренные значения I и U (с погрешностями).

На **рис. 5** приведен пример графика зависимости $I(U)$. Суть метода МНК в том, что провести линию (прямую или другую функциональную зависимость) через экспериментальные точки надо так, чтобы сумма квадратов длин вертикальных отрезков от экспериментальных точек до этой линии была минимальна.

Прямая линия описывается уравнением $y(x) = Ax + B$ или в нашем, частном случае, $I(U) = AU$.

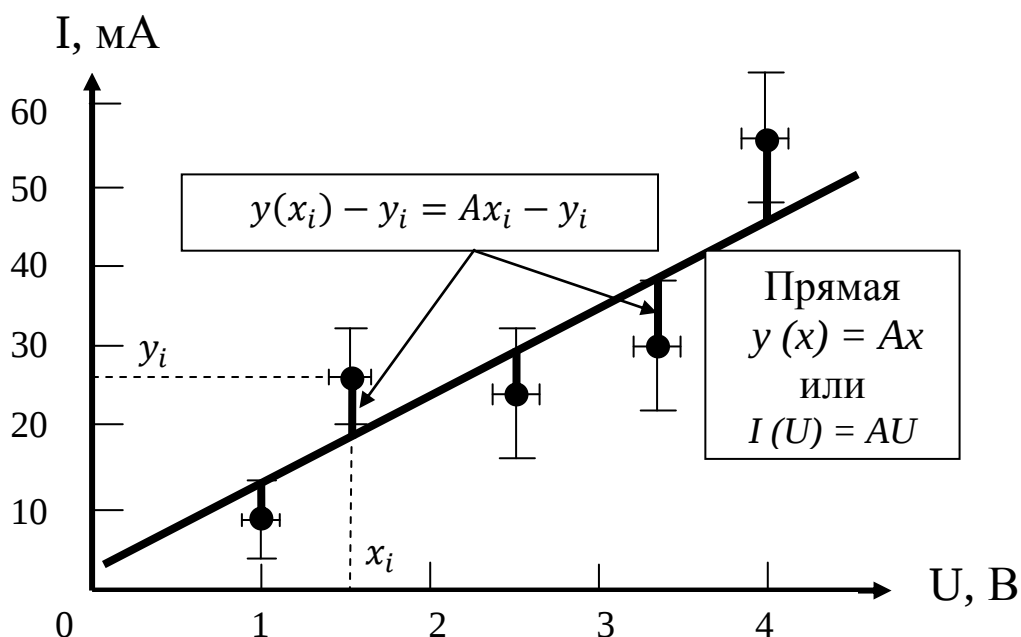


Рис.5. Построение прямой методом наименьших квадратов.

Замечание. Приведенные ниже формулы получены в приближении, когда величина X измерена точно или погрешность по независимой переменной X пренебрежимо мала по сравнению с погрешностью по Y (сравнивают относительные погрешности).

В данной задаче измерения напряжения на большинстве резисторов можно провести более точно, чем измерения силы тока. Кроме того, регулируя напряжение питания, вы можете *выставлять* значения напряжений и исключить погрешность считывания. Если же относительная погрешность по величине X значительно больше относительной погрешности по Y , то для расчетов МНК по оси X надо отложить величину с меньшей погрешностью.

Для того чтобы найти угол наклона прямой (и из него вычислить сопротивление резистора), составим функционал из суммы квадратов длин отрезков от экспериментальных точек до прямой с учетом погрешностей:

$$\sum_{i=1}^N \frac{(Ax_i - y_i)^2}{\sigma_i^2}$$

Из условия минимума этого функционала по параметру A получим (дифференцируем функционал по параметру A , производную приравняем к «0»):

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

Параметр A – это косвенно измеренная величина (через прямо измеренные величины $\{y_i\}$ с погрешностями $\{\sigma_i\}$). Найдем погрешность параметра A по формуле косвенных измерений, получим:

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

Постройте график зависимости $I(U)$ методом МНК; определите сопротивление резистора, сравните с полученными ранее результатами.

Упражнение 3. Измерение вольтамперной характеристики нелинейного элемента

$ВАХ$ 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 токе, т.е. в динамическом режиме. В данном упражнении измеряется $ВАХ$ полупроводникового p/n перехода на постоянном токе.

Типичная $ВАХ$ полупроводниковых элементов с одним p/n переходом представлена на **рис. 6** (краткие сведения о некоторых полупроводниковых элементах можно получить в [3], но это не обязательно, для выполнения задачи достаточно информации, приведенной ниже).

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

В отличие от обычного выпрямительного диода, **стабилитрон** не разрушаясь, работает в режиме электрического пробоя (если ток через него не превышает допустимых значений).

Светодиоды

работают в прямом режиме. Напряжения пробоя у них небольшие (единицы Вольт). При кратковременном единичном включении в обратной полярности небольшого напряжения свойства светодиода после пробоя могут восстановиться, а могут вызывать и необратимые разрушения. Поэтому необходимо соблюдать полярность подключения светодиода или для безопасности работы параллельно, навстречу ему, подключать диод (например, при работе с переменным током).

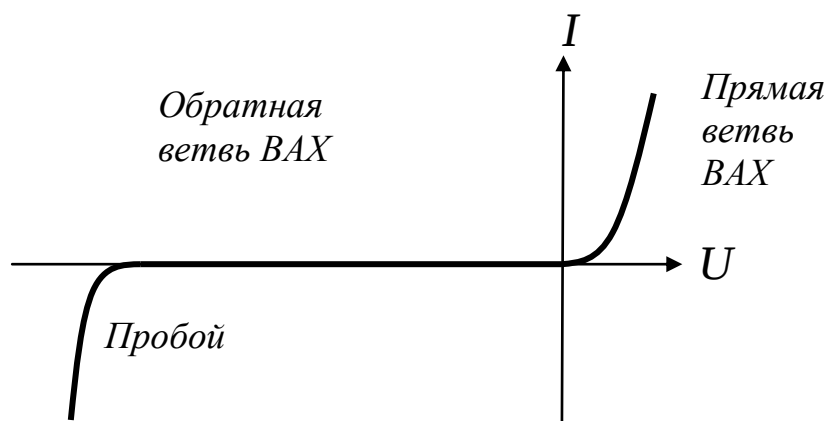


Рис. 6. Типичная характеристика полупроводникового элемента с одним p/n переходом

В упражнении проводятся измерения ВАХ на двух светодиодах. Для того, чтобы не работать на обратной ветви ВАХ, в целях безопасности светодиода, используются два светодиода (в некоторых вариантах эти два светодиода смонтированы внутри одного корпуса), подключенных параллельно, навстречу друг другу.

Поскольку у полупроводниковых элементов с p/n переходом нелинейная зависимость силы тока от напряжения, для них не указывают значение рабочего напряжения: небольшое изменение напряжения может вызвать значительное (в десятки раз) изменение тока. Для светодиодов указывают рабочий и предельно допустимый токи. Для светодиодов **предельно допустимый ток** обычно не превышает 10 – 20 мА (в данной задаче **10 мА**).

Собрать схему для измерения ВАХ или на плате для первых упражнений, если в ней есть светодиоды, или на отдельной плате (**рис. 7**).

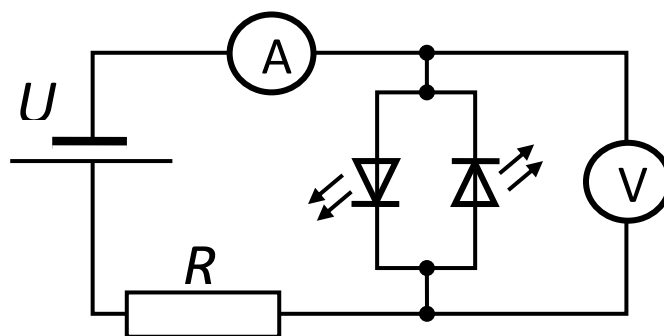


Рис. 7. Схема для измерения вольтамперной характеристики светодиода.

Дополнительный резистор R , включенный последовательно со светодиодами, необходим для ограничения максимального тока и подобран таким, чтобы можно было подавать на схему любое напряжение от -25 до $+25$ 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, способных к резким изменениям тока.

Измерение ВАХ состоит в регистрации тока $I(U)$ и напряжения U на светодиоде, при изменении напряжения с блока питания, приблизительно в пределах $(-20 \dots +20)$ В. Чтобы не превысить **предельно допустимый ток на светодиоде – 10 мА**, напряжение питания будем регулировать, **устанавливая ток** в цепи от 0 до 10 мА с шагом 0,1- 1 мА (выбирается из условия четкого представления хода ВАХ во всех ее участках).

При построении графика нужно выбрать наиболее удобный масштаб. На графике нужно изобразить интервалы погрешностей экспериментальных точек.

Оформление упражнения включает: схему измерения, **номер платы**, таблицу данных, график.

Примерные вопросы к допуску и сдаче задачи

- Как оценить погрешности измерений стрелочными и цифровыми приборами?
- Проведите полные выкладки формул (1) и (2) МНК.
- Влияние собственных сопротивлений амперметра и вольтметра на точность измерений силы тока и напряжений.
- Почему в упражнении 3 вольтметр и амперметр рекомендуется подключить к измеряемому резистору по варианту Рис.3а?
- Для какой части вольтамперной характеристики диода вольтметр и амперметр лучше подключать по варианту Рис.3а и Рис.3б?

Литература

1. Д.А. Соболев, «Введение в технику физического эксперимента» 1993 г. Изд. МГУ: §3,4,5,8,9,10;
2. И.В. Митин, В.С. Русаков. Анализ и обработка экспериментальных данных. 2012г. Изд. МГУ.
3. Д.А. Соболев, «Введение в технику физического эксперимента» 1993 г. Изд. МГУ: §25.