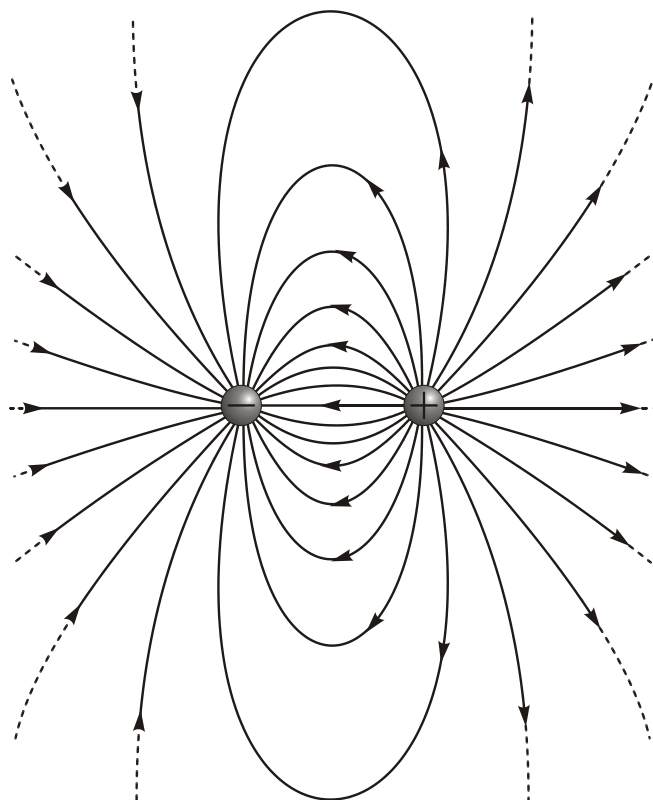


ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ЭЛЕКТРОСТАТИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

Лабораторный практикум по физике



Пенза
Издательство ПГУ
2010

УДК 537.3(076)
Э45

Рецензент:
кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры «Общая физика» Пензенского государственного
педагогического университета им. В. Г. Белинского
Р. В. Зайцев

Э45 **Электростатика. Электрический ток:** лабораторный практикум по физике/ сост.: А.В.Задера, С.Е.Кривецков, Е.А.Тюрин; под ред. С.Е.Кривецкова. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2010. –

Данные методические указания охватывают лабораторные работы по разделам «Электростатика» и «Электрический ток» курса общей физики (№ 1.1, 1.2, 2.1, 2.2, 2.3, 2.4). Указания к каждой работе содержат общие теоретические сведения, описание установки и метода измерений, порядок выполнения измерений, порядок обработки результатов измерений и контрольные вопросы.

Методические указания соответствуют программе курса общей физики и предназначены для студентов технических специальностей Пензенского государственного университета.

УДК 537.3(076)

СОДЕРЖАНИЕ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.1	
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ МЕТОДОМ МОДЕЛИРОВАНИЯ.	4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.2	
ИЗМЕРЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ	10
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.1	
ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКА	16
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.2	
ИЗМЕНЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ	23
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.3	
ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИСТОЧНИКА ТОКА.	30
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.4	
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ	35
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	
ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ (ПРИБОРНЫЕ) ПОГРЕШНОСТИ	43
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	
ПОРЯДОК ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ	44

Лабораторная работа № 1.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ МЕТОДОМ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Цель работы: экспериментальное исследование электростатического поля методом моделирования.

Оборудование: электролитическая ванна, электроды, источник питания, вольтметр, подвижный зонд.

Общие сведения

Электростатическое поле характеризуется двумя величинами: векторной – напряженностью \vec{E} и скалярной – потенциалом φ .

Напряженность электрического поля в некоторой точке равна

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}, \quad (1.1.1)$$

где \vec{F} – сила, действующая со стороны электрического поля на пробный заряд величиной q , помещенный в данную точку. **Потенциал электростатического поля в некоторой точке равен**

$$\varphi = \frac{W_{\text{п}}}{q}, \quad (1.1.2)$$

где $W_{\text{п}}$ – потенциальная энергия пробного заряда q , помещенного в данную точку поля.

Для наглядного изображения электростатического поля используются силовые линии и эквипотенциальные поверхности. **Силовые линии** – это линии, касательные к которым в каждой их точке совпадают с направлением вектора напряженности электрического поля. Силовые линии строят так, чтобы они начинались на положительных зарядах и оканчивались на отрицательных или уходили в бесконечность. Густота силовых линий должна быть пропорциональна модулю напряженности электрического поля в данном месте.

Эквипотенциальные поверхности – это поверхности, во всех точках которых потенциал одинаков. Эквипотенциальные поверхности и силовые линии электростатического поля в точках пересечения всегда взаимно перпендикулярны.

Напряженность и потенциал электростатического поля связаны соотношением

$$\vec{E} = -\text{grad } \varphi = -\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \vec{k} \right). \quad (1.1.3)$$

Такая связь означает, что вектор напряженности направлен в сторону наиболее резкого убывания потенциала, а модуль напряженности равен скорости изменения потенциала в этом направлении:

$$E = \left| \frac{d\phi}{dl} \right| \quad (1.1.4)$$

Форма эквипотенциальных поверхностей однозначно задает картину силовых линий. Исследовав распределение потенциала, можно построить и эквипотенциальные поверхности, и силовые линии.

При разработке различных электронных приборов необходимо знание электростатического поля между электродами сложной формы. Часто теоретическое решение такой задачи затруднительно. В таких случаях применяют метод моделирования электростатических полей.

Рассмотрим сущность метода моделирования. Предположим, нам необходимо изучить электростатическое поле, создаваемое двумя заряженными проводниками (электродами) в вакууме или в воздухе. На рис. 1.1.1 показан пример плоского электростатического поля, т.е. поля, силовые линии которого лежат в одной плоскости. Сплошные линии со стрелками – это силовые линии, пунктирные – эквипотенциальные линии. Обратите внимание, что силовые и эквипотенциальные линии взаимно перпендикулярны в точках пересечения. Силовые линии перпендикулярны и к поверхностям электродов (т.к. поверхности электродов также являются эквипотенциальными).

При моделировании изготавливаются увеличенные модели электродов, которые погружают в электролитическую ванну, заполненную слабо проводящей жидкостью, например, обычной водой. С помощью вольтметра и подвижного зонда 1 (рис. 1.1.1) исследуется распределение потенциала в пространстве между электродами. Второй вывод вольтметра при этом подсоединяется к одному из электродов, который называют опорным. Зонд изготавливают обычно из тонкой проволоки, закрепленной в изолирующей ручке.

В такой модели в проводящей среде возникает электрический ток. Линии тока при определенных условиях будут совпадать с силовыми линиями электрического поля между моделируемыми электродами. Эти условия – следующие:

- жидкость должна быть однородной;
- удельная проводимость жидкости должна быть гораздо меньше, чем проводимость металла, из которого изготовлены модели электродов;

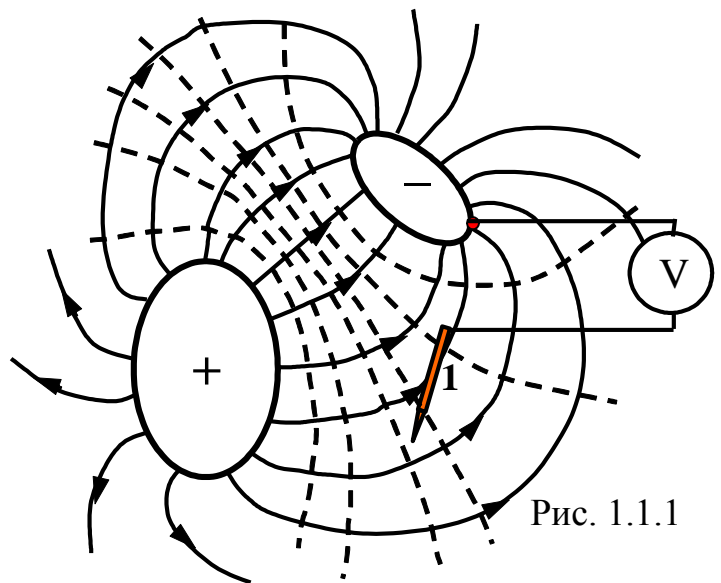


Рис. 1.1.1

- между электродами необходимо поддерживать постоянную разность потенциалов с помощью источника тока;
- размеры электролитической ванны должны быть велики по сравнению с размерами исследуемой системы электродов.

Для того, чтобы электрическое поле в модели было таким же, как в исследуемом объекте, необходимо чтобы были одинаковыми не только уравнения, описывающие эти поля, но и граничные условия для этих полей. При малых токах и высокой электропроводности материалов, из которых изготовлены электроды, поверхности электродов будут эквипотенциальными, и вектор напряженности электрического поля \vec{E} будет перпендикулярен поверхности электродов. Это соответствует граничным условиям для электростатического поля на поверхности проводника.

При проведении исследований следует иметь в виду, что в модели нет составляющей плотности тока перпендикулярной поверхности жидкости. Поэтому в моделируемом поле не должно быть компоненты напряженности, перпендикулярной этой поверхности. По этой причине установка, используемая в работе, позволяет моделировать только плоские электрические поля.

Описание установки и метода измерений

В данной работе моделирование электростатического поля осуществляется с помощью электролитической ванны 1 (рис.1.1.2), которая

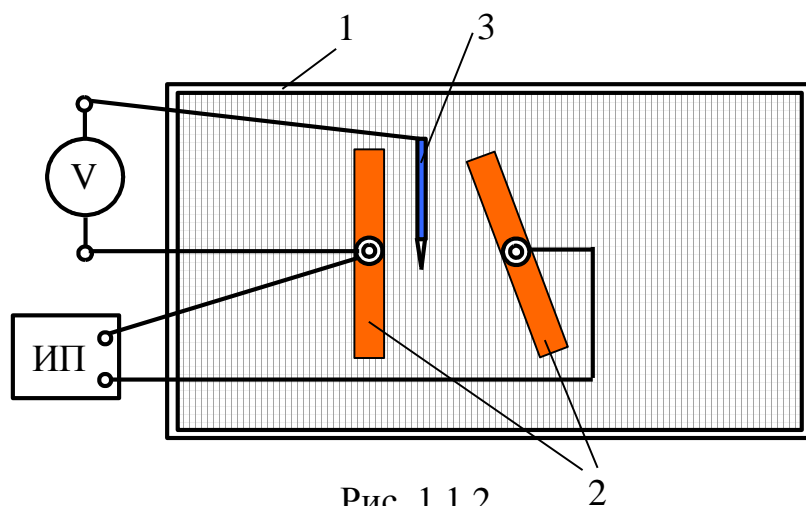


Рис. 1.1.2

представляет собой неглубокий сосуд с плоским дном, изготовленный из оргстекла. Для удобства измерений на дне ванны нанесена сетка. Сторона каждой клетки равна 1 см. При выполнении измерений на дно ванны наливается тонкий слой воды и помещается система электродов 2, электрическое поле

которой необходимо исследовать. Кроме ванны в состав лабораторной установки входят: источник питания ИП, к которому подключаются электроды, и вольтметр V. Вольтметр служит для измерения разности потенциалов между опорным электродом, и точкой поля, в которую помещен подвижный зонд 3 – электрод малых размеров, подключенный ко второму зажиму вольтметра.

В ходе исследования с помощью подвижного зонда отыскиваются точки, имеющие одинаковый потенциал. С этой целью зонд помещают в любую произвольную точку на дне ванны и измеряют потенциал этой точки.

Затем, при перемещении зонда отыскивается и с соблюдением масштаба переносится на чертеж ряд других точек, имеющих тот же потенциал. Объединяя эту группу точек плавной кривой, получим эквипотенциальную линию. Затем зонд помещается в следующую точку, имеющую другой потенциал, и повторяются измерения. В результате отыскивается положение следующей эквипотенциальной линии. Повторяя измерения, можно построить достаточно большое число эквипотенциальных линий и с их помощью графически представить распределение потенциала в пространстве.

Построив эквипотенциальные линии, можно определить и ход силовых линий электрического поля. При построении силовых линий необходимо учитывать, что они перпендикулярны к эквипотенциальным линиям. Поэтому для построения силовых линий на чертеже необходимо так провести группу кривых, чтобы они пересекали эквипотенциальные линии под прямым углом, и указать направление этих линий от положительно заряженного электрода к отрицательно заряженному (положительно заряженным считаем электрод, потенциал которого больше).

При протекании постоянного электрического тока вследствие электрохимических процессов изменяется химический состав среды вблизи электродов. Это явление называется поляризацией и сопровождается возникновением ЭДС – ЭДС поляризации. Для исключения появления ЭДС поляризации, искажающей поле, практически исследуется переменное поле частотой 50 Гц. В этом случае распределение потенциала в пространстве в каждый момент времени будет таким же, как и при использовании постоянного тока. Следовательно, потенциал каждой точки может быть сопоставлен со значением переменного напряжения, измеряемого вольтметром. При оформлении же результатов можно положить, что один из электродов заряжен положительно, а другой – отрицательно.

Порядок выполнения измерений

1. Получить у преподавателя допуск к выполнению работы и указания по расположению электродов и значениям потенциала линий, которые вам будет необходимо построить. Записать в рабочей тетради ряд заданных вам значений потенциала $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3 \dots$

2. Налить в ванну воду, которая должна покрывать дно тонким (в несколько миллиметров) равномерным слоем. При необходимости с помощью винтов, которыми снабжены опоры ванны, установить ванну в горизонтальное положение.

3. Подключить вольтметр и источник питания к электродам в соответствии с рис. 1.1.2.

4. Выполнить в рабочей тетради с соблюдением масштаба рисунок с изображением электродов. Обычно удобно использовать масштаб 1:2, т.е.

одной клетке сетки на дне ванны (1 см) должна соответствовать одна клетка ученической тетради (0,5 см).

5. Включить источник питания.

6. Располагая подвижный зонд вертикально, опереть его в дно ванны. Перемещая зонд в промежутке между электродами, убедиться, что показания вольтметра плавно изменяются от нуля (когда зонд касается опорного электрода) до максимума, равного напряжению источника питания (когда зонд касается второго электрода). На изображениях электродов написать их потенциалы.

7. Найти точку с первым заданным вам потенциалом φ_1 . Отметить на чертеже её положение. Переместить зонд на 1 – 2 см так, чтобы потенциал оставался равным φ_1 . Снова отметить положение точки на чертеже. Дальнейшие измерения проводятся аналогично. В результате вы должны получить ряд точек, опоясывающих по возможности большую поверхность опорного электрода.

8. Провести через найденные точки плавную кривую. Это будет эквипотенциальная линия, соответствующая потенциалу φ_1 . Около нее написать значение потенциала φ_1 .

9. Аналогичные измерения провести для других заданных вам значений потенциала.

10. Выключить лабораторную установку и предъявить результаты измерений преподавателю. Преподаватель должен указать вам 3 – 4 области, для которых вы рассчитаете напряженность электрического поля.

Обработка результатов измерений

1. По найденным вами эквипотенциальным линиям построить силовые линии электростатического поля. При этом использовать правила:

- силовые линии должны быть направлены в сторону убывания потенциала;
- в точках пересечения силовые и эквипотенциальные линии должны быть взаимно перпендикулярны;
- т.к. поверхности электродов являются эквипотенциальными, силовые линии должны подходить к ним также перпендикулярно.

Пример построения силовых линий показан на рис. 1.1.1.

2. Для указанных преподавателем областей вычислить модуль средней напряженности электрического поля по формуле

$$E = \frac{|\Delta\varphi|}{\Delta l},$$

где Δl – расстояние между соседними эквипотенциальными линиями в данной области; $|\Delta\varphi|$ – разность потенциалов соседних эквипотенциальных линий.

3. Постройте векторы напряженности поля для заданных областей, определив их направление как направление наиболее резкого убывания потенциала. Длина вектора должна быть пропорциональна модулю напряженности.

Контрольные вопросы

1. Электрический заряд и его свойства.
2. Что такое напряженность электрического поля. Единица её измерения. Напряженность поля одиночного точечного заряда (величина и направление).
3. Принцип суперпозиции для напряженности электрического поля. Приведите пример его применения.
4. Что такое силовые линии электрического поля? Каковы правила их построения? Изобразите с помощью силовых линий поле одиночного заряда, электрического диполя.
5. Докажите, что электростатическое поле является потенциальным.
6. Что такое циркуляция и чему она равна для электростатического поля?
7. Дайте определение потенциала электростатического поля. Единица измерения потенциала. Чему равен потенциал поля одиночного точечного заряда? Принцип суперпозиции для потенциала.
8. Вывести связь между напряженностью и потенциалом электростатического поля.
9. Что такое эквипотенциальные поверхности? Каково взаимное расположение эквипотенциальных поверхностей и силовых линий электростатического поля? Изобразите с помощью силовых линий и эквипотенциальных поверхностей однородное и неоднородное поля.
10. В некоторой области пространства создано однородное электростатическое поле. Как изменится поле, если в него поместить проводник?

Лабораторная работа № 1.2

ИЗМЕРЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ

Цель работы: измерение электрической ёмкости методом баллистического гальванометра, определение диэлектрической проницаемости диэлектрика.

Оборудование: измерительный блок (состоящий из источника питания, гальванометра, вольтметра), исследуемый конденсатор, эталонный конденсатор, соединительные провода.

Общие сведения

Конденсатор – система из двух изолированных проводников, расположенных близко друг к другу. Эти проводники называют обкладками конденсатора. Если обкладкам конденсатора сообщить заряды $+q$ и $-q$, то в пространстве между обкладками возникнет электрическое поле. Основной характеристикой конденсатора является **электроёмкость** C , которая равна

$$C = \frac{q}{\Delta\phi}, \quad (1.2.1)$$

где q – модуль заряда обкладок, $\Delta\phi$ – разность потенциалов обкладок.

Электроёмкость конденсатора зависит от формы, размеров обкладок, расстояния между ними, а также диэлектрической проницаемости среды, заполняющей пространство между обкладками. Например, для плоского конденсатора

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}, \quad (1.2.2)$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость среды, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ – электрическая постоянная, S – площадь обкладок, d – расстояние между обкладками.

В данной работе формула (1.2.2) используется для определения диэлектрической проницаемости диэлектрика.

Описание установки и метода измерений

Формула ёмкости плоского конденсатора строго справедлива только для идеального плоского конденсатора, имеющего бесконечную площадь обкладок. Поле внутри такого конденсатора однородное и сосредоточено между обкладками. В реальном конденсаторе с конечной площадью обкладок имеет место краевой эффект – «выпучивание» поля (рис.

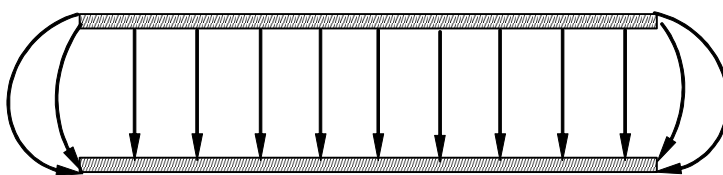


Рис. 1.2.1

«выпучивание» поля (рис.

1.2.1). В данной работе для устранения краевого эффекта применяется конденсатор со специальным охранным электродом.

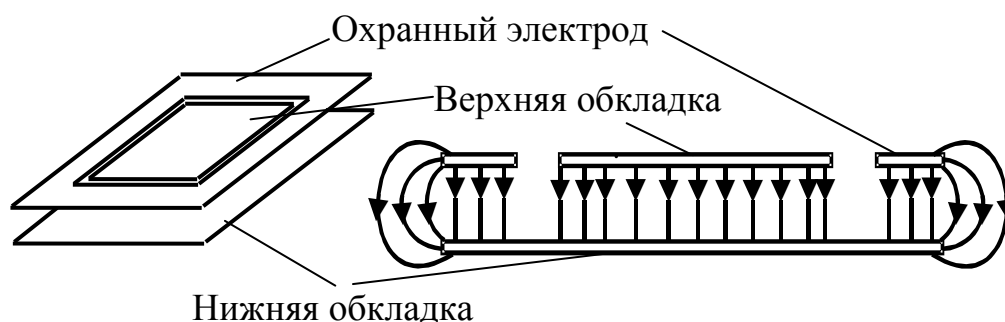


Рис. 1.2.2

На рис. 1.2.2 схематически представлен такой конденсатор и электрическое поле, создаваемое в случае, если потенциалы верхней обкладки и охранный электрода одинаковы. Как видно из рисунка, электрическое поле внутри такого конденсатора однородно (как и поле идеального конденсатора). Следовательно, емкость плоского конденсатора, образованного его нижней обкладкой и рабочей частью верхней обкладки можно точно рассчитать по формуле емкости плоского конденсатора.

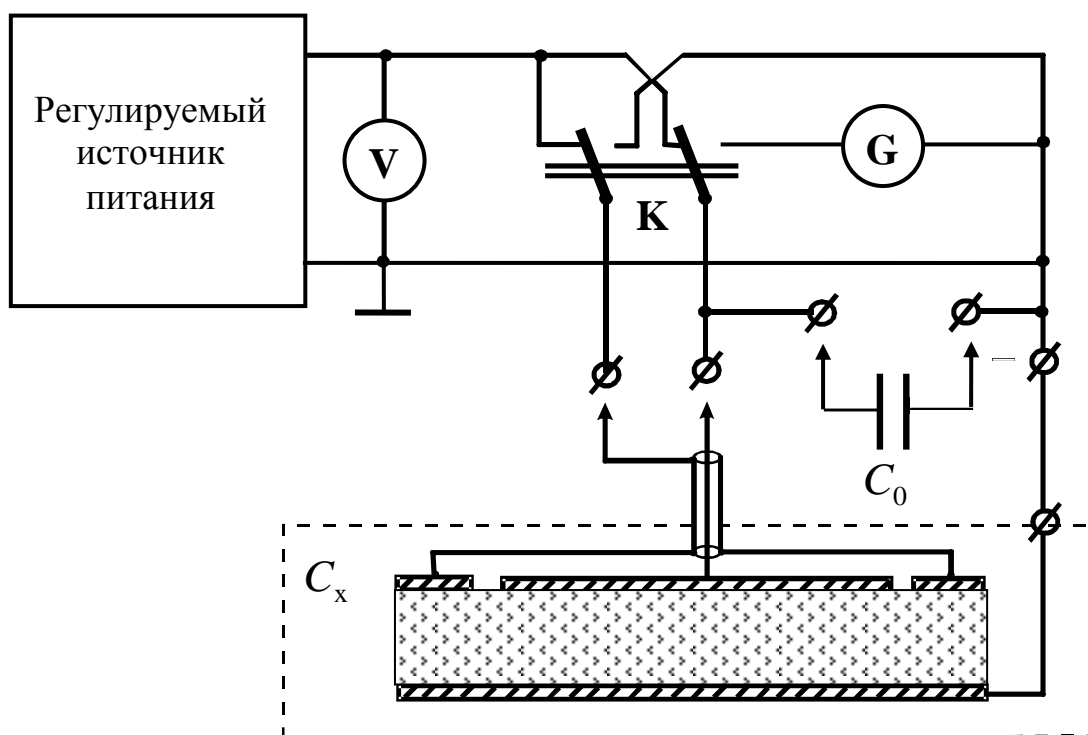


Рис. 1.2.3

Электрическая схема установки приведена на рис. 1.2.3. В исходном положении кнопки К регулируемый источник питания подключается к конденсатору (либо эталонному – C_0 , либо рабочему – C_x), в результате чего конденсатор заряжается до напряжения U . Значение этого напряжения измеряется вольтметром V. При нажатии кнопки К конденсатор разряжается до нуля через гальванометр G.

Гальванометр работает в режиме баллистического гальванометра. От обычного гальванометра баллистический гальванометр отличается увеличенной массой (и, следовательно, увеличенным моментом инерции) подвижной части. При прохождении через такой гальванометр импульса разрядного тока длительность последнего оказывается малой по сравнению с периодом колебаний подвижной части (постоянной времени) гальванометра. Таким образом, протекание тока через гальванометр закончится раньше, чем его подвижная часть успеет заметно отклониться от положения равновесия, а максимальный угол отклонения будет пропорционален импульсу тока, т.е. количеству электричества, прошедшему через гальванометр

$$q = \int_0^{\tau} i dt$$

где τ – длительность импульса, i – мгновенное значение силы тока. При этом максимальный угол отклонения α подвижной системы гальванометра (первый баллистический отброс) пропорционален количеству электричества, протекающему через гальванометр (т.е. заряду конденсатора):

$$\alpha = \frac{q}{B}$$

где B – баллистическая постоянная, зависящая от типа гальванометра.

Лабораторная установка, используемая в лабораторной работе, построена таким образом, что заряд q (заряд, протекающий через гальванометр) – это заряд, накопленный только в рабочей части верхней обкладки. Заряд с охранного электрода протекает по цепи в обход гальванометра. Таким образом, достигается устранение краевого эффекта.

Конструктивно источник питания, вольтметр, гальванометр, коммутирующая кнопка объединены в измерительный блок. Рабочий конденсатор подключается к блоку специальными кабелями.

Метод определения диэлектрической проницаемости ϵ , используемый в данной работе, основан на измерении электрической емкости плоского конденсатора, внутрь которого помещается пластина исследуемого диэлектрика. Эту емкость можно измерить, сравнивая емкость плоского конденсатора с емкостью эталонного конденсатора. Методика измерения следующая. Сначала производится заряд и последующий разряд через цепь баллистического гальванометра эталонного конденсатора – C_0 , емкость которого известна. Если напряжение, до которого зарядился конденсатор, равно U , то на его обкладках накопится заряд $q_0 = C_0 U$. При разряде конденсатора через гальванометр, стрелка прибора отклоняется на угол

$$\alpha_0 = \frac{q_0}{B}.$$

Затем вместо эталонного конденсатора подключается рабочий – C_x . При том же напряжении U на конденсаторе, его заряд равен $q_x = C_x U$, а отклонение стрелки гальванометра $\alpha_x = \frac{q_x}{B}$. Отношение отклонений

$\frac{\alpha_x}{\alpha_0} = \frac{q_x}{q_0} = \frac{C_x}{C_0}$, откуда $C_x = C_0 \frac{\alpha_x}{\alpha_0}$. Измерив площадь S рабочей части обкладки и расстояние d между обкладками, можно рассчитать искомое значение ϵ_x :

$$C_x = \frac{\epsilon_0 \epsilon_x S}{d} = C_0 \frac{\alpha_x}{\alpha_0},$$

$$\epsilon_x = \frac{C_0 \alpha_x d}{\epsilon_0 \alpha_0 S} = \frac{C_0 \alpha_x d}{\epsilon_0 \alpha_0 ab}, \quad (1.2.3)$$

где a, b – длина и ширина рабочей части обкладки.

Порядок выполнения измерений

1. Получить от преподавателя допуск к выполнению работы и указания по значению напряжения U , которое вы будете подавать на конденсатор.

2. Ознакомиться с установкой, органами управления и измерительными приборами.

3. Записать в таблицу 1.2.1 значения напряжения U , емкости эталонного конденсатора C_0 и ее относительной погрешности δC_0 .

4. Подключить к измерительному блоку эталонный конденсатор C_0 . Включить питание и установить заданное напряжение U . Установить стрелку гальванометра на ноль. Нажимая на кнопку «разряд», зафиксировать максимальное отклонение стрелки гальванометра α_0 . Результат записать в таблицу. Повторить это измерение еще 4 раза. Перед каждым разрядом конденсатора контролировать нулевое положение стрелки гальванометра. Выключить питание измерительного блока. Отключить эталонный конденсатор.

Табл. 1.2.1.

$U = \dots$ В			
$C_0 = \dots\dots$ пФ, $\delta C_0 = \dots\dots$			
№ изм.	α_{0i}	$\langle \alpha_0 \rangle$	$\Delta \alpha_{0\text{сл}}$
1			
2			
3			
4			
5			

5. Снять верхнюю обкладку исследуемого конденсатора. Вынуть пластину диэлектрика. С помощью линейки измерить длину a и ширину b рабочей части верхней обкладки конденсатора (по прорези с нижней стороны верхней обкладки). С помощью штангенциркуля измерить толщину d пластины исследуемого диэлектрика. Записать результаты измерений с учетом инструментальных погрешностей в таблицу 1.2.2.

Табл. 1.2.2.

$U = \dots\dots В$			
$a = \dots\dots \Delta a_{ин} = \dots\dots b = \dots\dots \Delta b_{ин} = \dots\dots d = \dots\dots \Delta d_{ин} = \dots\dots$			
Вид диэлектрика – $\dots\dots$			
№ изм.	α_{xi}	$\langle \alpha_x \rangle$	$\Delta \alpha_{x \text{ сл}}$
1			
2			
3			
4			
5			

6. Собрать конденсатор, поместив в него исследуемый образец диэлектрика. С помощью разъема подключить конденсатор к измерительному блоку.

7. Включить питание измерительного блока. Установить с помощью регулятора заданное напряжение U . Проверить, находится ли стрелка гальванометра на нуле. В противном случае с помощью регулятора установить стрелку гальванометра на нуль.

8. Пять раз произвести разряд конденсатора, фиксируя максимальное отклонение стрелки гальванометра. Результаты записать в таблицу 1.2.2.

9. Выключить питание измерительного блока. Отключить исследуемый конденсатор.

10. Предъявить результаты измерений преподавателю.

Обработка результатов измерений

1. Обработать результаты измерений α_0 и α_x , используя метод Корнфельда (см. Приложение 2).

2. Вычислить среднее значение диэлектрической проницаемости $\langle \epsilon_x \rangle$ по формуле (1.2.3), подставив в качестве α_0 и α_x их средние значения.

3. Оценить относительную погрешность диэлектрической проницаемости по формуле

$$\delta \epsilon_x = \sqrt{(\delta C_0)^2 + (\delta \alpha_0)^2 + (\delta \alpha_x)^2 + (\delta a)^2 + (\delta b)^2 + (\delta d)^2}.$$

4. Вычислить абсолютную погрешность $\Delta \epsilon_x = \delta \epsilon_x \cdot \langle \epsilon_x \rangle$.

5. Записать окончательный результат в виде $\epsilon_x = \langle \epsilon_x \rangle \pm \Delta \epsilon_x$.

Контрольные вопросы

1. Какие материалы называются диэлектриками? В чем заключается явление поляризации диэлектриков?
2. Виды поляризации диэлектриков (деформационная, ориентационная, ионная).
3. Дать определение поляризованности (вектора поляризации) диэлектрика. Вывести связь между поляризованностью и поверхностной плотностью связанных зарядов.
4. Какова связь между поляризованностью и напряженностью электрического поля? Что такое электрическое смещение (индукция) и как оно связано с напряженностью электрического поля?
5. Сформулируйте теорему Остроградского-Гаусса для электростатического поля в диэлектрике.
6. Дать определение емкости конденсатора. Вывести формулу для емкости плоского конденсатора. Изобразите поле плоского конденсатора. Что такое краевой эффект?
7. В чем заключается баллистический метод измерения емкости?
8. С какой целью в конструкции исследуемого конденсатора введен «охранный электрод»?

Лабораторная работа № 2.1

ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКА

Цель работы: изучение метода измерения сопротивления с использованием амперметра и вольтметра, измерение удельного сопротивления проводника.

Оборудование: установка для измерения удельного сопротивления проволоки, микрометр.

Общие сведения

Из закона Ома для участка цепи следует, что сопротивление

$$R = \frac{U}{I}, \quad (2.1.1)$$

где U, I – напряжение и сила тока на участке, соответственно. Таким образом, измерив напряжение с помощью вольтметра и силу тока – с помощью амперметра, можно по формуле (2.1.1) рассчитать сопротивление.

Возможны две схемы включения амперметра и вольтметра (рис. 2.1.1). Проведем анализ каждой из них.

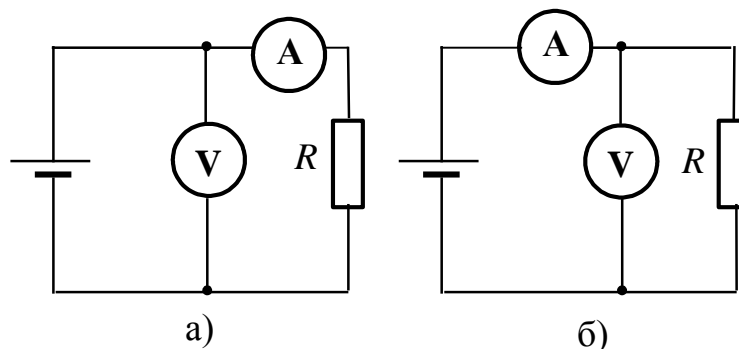


Рис. 2.1.1

«Идеальный амперметр» должен обладать нулевым внутренним сопротивлением, «идеальный вольтметр» – бесконечным внутренним сопротивлением. Если бы в нашем распоряжении были такие приборы, то при использовании обеих схем мы получили бы один и тот же результат. Но реальные амперметры имеют не нулевое внутреннее сопротивление, а реальные вольтметры – не бесконечное внутреннее сопротивление. Это нужно учитывать, проводя измерения. При использовании схемы а) амперметр покажет значение тока через измеряемое сопротивление. Но вольтметр измерит напряжение на последовательно соединенных амперметре и сопротивлении. Поэтому, вычислив сопротивление по формуле (2.1.1), мы допустим ошибку. В схеме б) вольтметр измерит напряжение на сопротивлении, но зато амперметр покажет ток, идущий через параллельно соединенные вольтметр и сопротивление. И в этом случае вычисление по формуле (2.1.1) приведет к неточному результату. Таким образом, использование обеих схем сопровождается методической погрешностью.

Оценим методическую погрешность обоих способов включения амперметра и вольтметра.

Схема а) (рис. 2.1.1).

Обозначим: U – показания вольтметра, I – показания амперметра, R_A – внутреннее сопротивление амперметра. Тогда по закону Ома

$$U = I(R + R_A).$$

В результате вычислений получим

$$R_{\text{изм}} = \frac{U}{I} = \frac{I(R + R_A)}{I} = R + R_A, \quad (2.1.2)$$

т.е. результат нашего измерения будет отличаться от истинного значения на величину внутреннего сопротивления амперметра R_A . Абсолютная методическая погрешность будет равна $\Delta R = |R - R_{\text{изм}}| = R_A$, относительная методическая погрешность

$$\delta R = \frac{\Delta R}{R} = \frac{R_A}{R}.$$

Очевидно, что такую схему измерений можно использовать, когда $R \gg R_A$.

Схема б) (рис. 2.1.1).

Снова полагаем, что U, I – показания вольтметра и амперметра, соответственно, а R_V – внутреннее сопротивление вольтметра. Тогда по закону Ома

$$U = I \frac{RR_V}{R + R_V}.$$

В результате вычислений получим

$$R_{\text{изм}} = \frac{U}{I} = \frac{RR_V}{R + R_V}. \quad (2.1.3)$$

Абсолютная методическая погрешность равна

$$\Delta R = |R - R_{\text{изм}}| = R - \frac{RR_V}{R + R_V} = \frac{R^2}{R + R_V}.$$

Следовательно, относительная методическая погрешность

$$\delta R = \frac{\Delta R}{R} = \frac{R}{R + R_V}.$$

Данную схему можно использовать при условии, что $R \ll R_V$.

Описание установки и метода измерений

Целью данной работы является определение удельного сопротивления сплава нихром. Известно, что сопротивление проводника постоянного поперечного сечения равно

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (2.1.4)$$

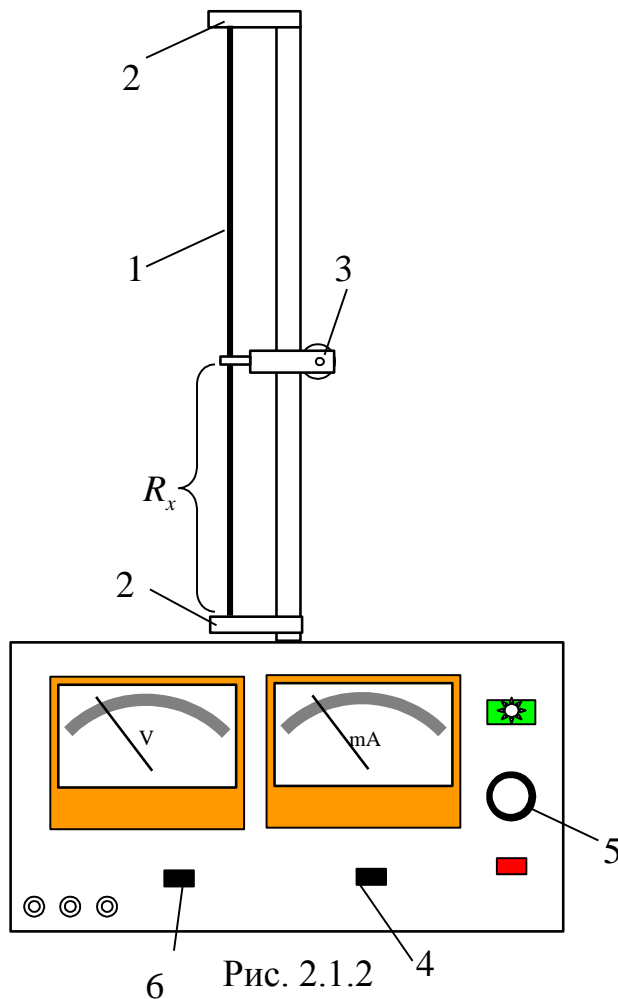
где ρ – удельное сопротивление материала, l , S – длина и площадь поперечного сечения проводника, соответственно. Тогда удельное сопротивление

$$\rho = \frac{RS}{l}. \quad (2.1.5)$$

Если взять проволоку круглого сечения, то

$$\rho = \frac{R\pi d^2}{4l}, \quad (2.1.6)$$

где d – диаметр проволоки. Таким образом, для определения удельного сопротивления необходимо измерить сопротивление проволоки, её диаметр и длину.



Лабораторная установка (рис. 2.1.2) состоит из блока питания, миллиамперметра и вольтметра, установленных в одном корпусе. К корпусу прикреплена стойка. В нижней и верхней частях стойки имеются неподвижные зажимы 2, в которых закреплена исследуемая проволока 1. По стойке может перемещаться подвижный зажим 3, имеющий контакт с проволокой. На стойке имеется линейка с миллиметровыми делениями, по которой измеряется расстояние между подвижным и нижним неподвижным зажимами. Это расстояние определяет длину той части проволоки, сопротивление которой R_x измеряется.

В установке предусмотрена возможность включения амперметра и вольтметра по двум схемам (рис. 2.1.3). Переключение с одной схемы на другую производится с помощью кнопки 4. Ручкой 5 можно регулировать силу тока, идущего по проволоке. Кнопкой 6 можно подключить исследуемую проволоку к выводам в нижней левой части прибора. В данной работе кнопка 6 всё время должна находиться в нажатом состоянии.

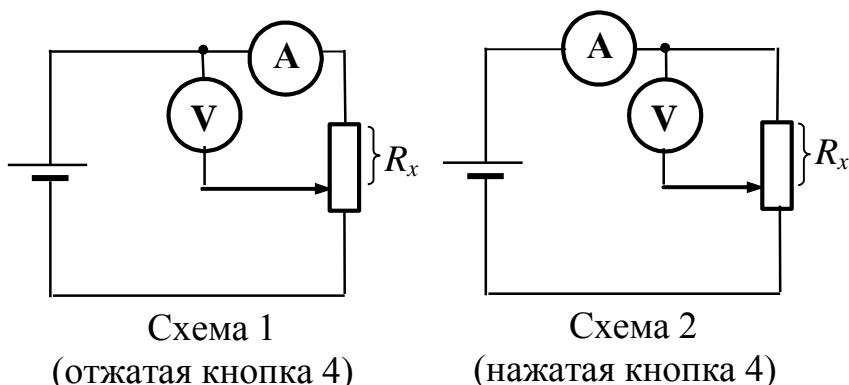


Рис. 2.1.3

Полное сопротивление исследуемой проволоки составляет несколько Ом. Поэтому, производя измерения, нужно учитывать сопротивление контактов, которые вносят дополнительную погрешность. Для того, чтобы исключить влияние контактных сопротивлений, а также влияние внутреннего сопротивления амперметра в схеме 1 (рис. 2.1.3), измерение удельного сопротивления производится следующим образом. Сначала определяются показания вольтметра и амперметра в обеих схемах при различных положениях подвижного зажима (т.е. при различной длине проволоки l). Затем по формуле (2.1.1) вычисляются сопротивления R_x .

Из формулы (2.1.6) следует, что

$$R_x = \frac{4\rho}{\pi d^2} l = kl,$$

где $k = \frac{4\rho}{\pi d^2}$ – коэффициент пропорциональности между R_x и l . Таким

образом, зависимость $R_x(l)$ – линейная, а коэффициент k определяет наклон этой зависимости. Построив график зависимости $R_x(l)$ и определив наклон k этого графика, можно рассчитать удельное сопротивление по формуле

$$\rho = \frac{\pi d^2 k}{4}. \quad (2.1.7)$$

На рисунке 2.1.4 показан типичный вид зависимости $R_x(l)$, построенный по результатам измерений. Как правило, результаты измерений не совсем точно лежат на одной прямой. Эту прямую (аппроксимирующую прямую) надо проводить так, чтобы число точек, лежащих выше неё, примерно равнялось числу точек, лежащих ниже неё. Построив прямую, нужно определить её наклон. Для этого на прямой берутся две любые точки (например, точки A и B) и

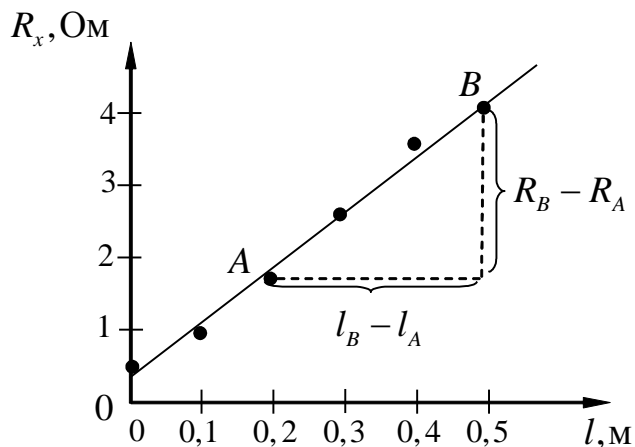


Рис. 2.1.4

определяются соответствующие им разности длин $l_B - l_A$ и сопротивлений $R_B - R_A$. Коэффициент наклона рассчитывается по формуле

$$k = \frac{R_B - R_A}{l_B - l_A}. \quad (2.1.8)$$

Затем по формуле (2.1.7) рассчитывается удельное сопротивление.

В примере, приведенном на рис.2.1.4, видно, что при $l = 0$ сопротивление $R_x \neq 0$. Значение $R_x(0)$ характеризует: для схемы 2 – сопротивление контактов R_k ; для схемы 1 – сумму сопротивления контактов и внутреннего сопротивления амперметра $R_k + R_A$.

Порядок выполнения измерений

1. Подготовить рабочую тетрадь для записи результатов измерений в виде табл. 2.1.1

Таблица 2.1.1

$l, \text{м}$	1 схема (отжатая кнопка 4)			2 схема (нажатая кнопка 4)		
	$U, \text{В}$	$I, \text{мА}$	$R_{x1}, \text{Ом}$	$U, \text{В}$	$I, \text{мА}$	$R_{x2}, \text{Ом}$

2. Получить от преподавателя допуск к выполнению работы и указания по значениям длины проволоки l , для которых вы будете проводить измерения.

3. Получить у дежурного лаборанта микрометр.

4. Включить лабораторную установку.

5. С помощью регулятора 5 установить силу тока в пределах 200 – 240 мА.

6. Устанавливая подвижный зажим на заданных преподавателем значениях l , произвести измерения напряжения и силы тока для обеих схем. Результаты записать в табл. 2.1.1.

7. С помощью микрометра измерить диаметр проволоки d в 5 точках. Результаты записать в табл. 2.1.2. Инструментальную погрешность $\Delta d_{\text{ин}}$ принять равной цене деления нониуса микрометра.

9. Предъявить результаты измерений преподавателю.

10. Выключить установку и сдать микрометр дежурному лаборанту.

Таблица 2.1.2
 $\Delta d_{\text{ин}} = \dots\dots\dots \text{мм}$

№ изм.	d_i , мм
1	
2	
3	
4	
5	
⋮	

Обработка результатов измерений

Для 1 схемы:

1. Вычислить R_{x1} по формуле (2.1.1) для каждого значения длины l . Результаты записать в таблицу 2.1.1. При расчетах необходимо силу тока выразить в амперах.

2. Построить график зависимости $R_{x1}(l)$ (см. рис. 2.1.4). Для этого отобразить графически все полученные значения сопротивлений и провести аппроксимирующую прямую.

3. Рассчитать наклон k_1 зависимости $R_{x1}(l)$. Для этого, выбрать две точки A и B , наиболее точно лежащие на аппроксимирующей прямой, и вычислить наклон по формуле (2.1.8).

Для 2 схемы: выполнить расчеты R_{x2} и k_2 по пунктам 1 ÷ 3.

4. Вычислить $\langle k \rangle = \frac{k_1 + k_2}{2}$, $\Delta k = \frac{k_1 - k_2}{2}$, $\delta k = \frac{\Delta k}{\langle k \rangle}$.

5. Вычислить $\langle d \rangle$, Δd , δd , используя метод Корнфельда (см. Приложение 2).

5. Вычислить среднее значение удельного сопротивления $\langle \rho \rangle$ по формуле (2.1.7), используя средние значения $\langle k \rangle$ и $\langle d \rangle$.

6. Вычислить относительную погрешность удельного сопротивления по формуле

$$\delta \rho \approx \sqrt{(2\delta d)^2 + (\delta k)^2}.$$

7. Вычислить абсолютную погрешность

$$\Delta \rho = \langle \rho \rangle \cdot \delta \rho$$

8. Записать окончательный результат для ρ . Сравните его с табличным значением.

Контрольные вопросы

1. Что называется электрическим сопротивлением? От чего оно зависит? Единица измерения сопротивления.
2. Вывести формулу для сопротивления последовательного соединения проводников.
3. Вывести формулу для сопротивления параллельного соединения проводников.
4. Что такое удельное сопротивление? Каковы характерные значения удельного сопротивления металлических проводников? Как удельное сопротивление металлов зависит от температуры?
5. Изобразите схемы, с помощью которых можно измерить электрическое сопротивление.
6. Вывести формулу относительной методической погрешности для схемы, используемой, когда $R \ll R_V$.
7. Вывести формулу относительной методической погрешности для схемы, используемой, когда $R \gg R_A$.
8. Оцените по результатам ваших измерений сопротивление контактов и внутреннее сопротивление амперметра. Какую из схем целесообразно использовать для измерения сопротивления проволоки, исследуемой в данной работе?
9. Расскажите о методе измерения удельного сопротивления, используемом в данной работе.

Лабораторная работа № 2.2

ИЗМЕНЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Цель работы: изучение метода изменения пределов измерения вольтметра и амперметра.

Оборудование: регулируемый источник питания, вольтметр, миллиамперметр, мультиметр, магазин сопротивлений, соединительные провода.

Общие сведения

1. Изменение предела измерения амперметра.

Амперметр – электроизмерительный прибор, предназначенный для измерения силы тока. Всякий амперметр характеризуется своим **пределом измерения** I_m – *максимальным значением силы тока, которое он может измерить*. Другой характеристикой амперметра является его внутреннее сопротивление R_A . Чем меньше внутреннее сопротивление, тем меньше изменение силы тока происходит на том участке цепи, куда включается амперметр. «Идеальным» называется амперметр с нулевым внутренним сопротивлением.

Для увеличения предела измерения амперметра применяется его шунтирование – подключение параллельно амперметру сопротивления $R_{ш}$, называемого шунтом (рис. 2.2.1). При этом часть тока $I_{ш}$ ответвляется через шунт, а общий измеряемый ток I'_m становится больше, чем предел измерения амперметра I_m . Такое соединение можно рассматривать как амперметр с новым пределом измерения, равным I'_m . Применим для расчета схемы правила Кирхгофа:

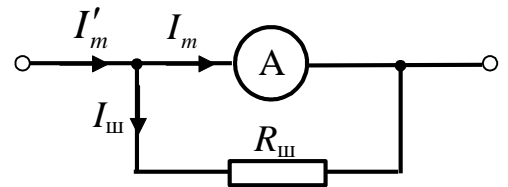


Рис. 2.2.1

$$\begin{cases} I'_m = I_m + I_{ш} \\ I_m R_A - I_{ш} R_{ш} = 0 \end{cases} \quad (2.2.1)$$

Решив эту систему уравнений относительно I'_m , получим

$$I'_m = I_m \left(1 + \frac{R_A}{R_{ш}} \right). \quad (2.2.2)$$

Таким образом, чем меньше будет сопротивление шунта $R_{ш}$, тем больше будет новый предел измерения I'_m . Выразим из (2.2.2) сопротивление шунта:

$$R_{ш} = \frac{R_A}{\frac{I'_m}{I_m} - 1} = \frac{R_A}{n - 1}, \quad (2.2.3)$$

где величину $n = \frac{I'_m}{I_m}$ называют коэффициентом шунтирования.

2. Изменение предела измерения вольтметра.

Вольтметр – электроизмерительный прибор, предназначенный для измерения разности потенциалов на участке цепи. Выводы вольтметра подключаются к тем точкам, разность потенциалов которых необходимо измерить. Для однородного участка цепи разность потенциалов равна напряжению на участке. Поэтому обычно говорят, что вольтметр измеряет напряжение на участке. **Пределом измерения вольтметра** U_m называют *максимальное значение напряжения, которое может измерить вольтметр*. Для того, чтобы при подключении вольтметра токи в схеме изменялись мало, необходимо, чтобы его бы внутреннее сопротивление R_v было как можно большим. «Идеальным» называют вольтметр с бесконечным внутренним сопротивлением.

Пределу измерения вольтметра соответствует максимальный ток вольтметра

$$I_m = \frac{U_m}{R_v}. \quad (2.2.4)$$

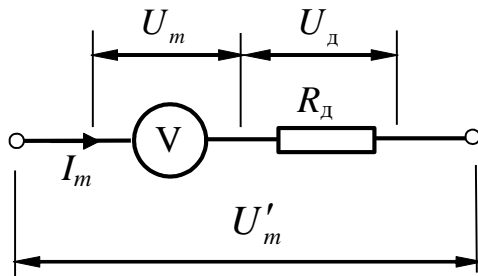


Рис. 2.2.2

Для изменения предела измерения вольтметра последовательно с ним включают добавочное сопротивление R_d (рис. 2.2.2).

При этом измеряемое напряжение U'_m равно

$$U'_m = U_m + U_d,$$

где U_d – напряжение на добавочном сопротивлении. Так как ток через вольтметр равен току через добавочное сопротивление, напряжение $U_d = I_m R_d$. Поэтому

$$U'_m = U_m + I_m R_d, \quad (2.2.5)$$

Откуда

$$R_d = \frac{U'_m - U_m}{I_m} = \frac{U'_m - U_m}{U_m} R_v = \left(\frac{U'_m}{U_m} - 1 \right) R_v = (m - 1) R_v, \quad (2.2.6)$$

где $m = \frac{U'_m}{U_m}$ – коэффициент изменения предела измерения напряжения.

Вольтметр с подсоединенным к нему добавочным сопротивлением можно рассматривать как вольтметр с новым пределом измерения, равным U'_m . Рассчитать добавочное сопротивление можно формуле (2.2.6).

Описание установки и метода измерения

Лабораторная установка (рис. 2.2.3) состоит из:

– регулируемого источника питания постоянного тока 1;
– вольтметра 2 и миллиамперметра 3, пределы измерения которых будут изменяться;

– многопредельного цифрового мультиметра (тестера) 4;

– магазина сопротивлений 5.

Для соединения приборов используется комплект из пяти проводов.

Источник питания, вольтметр и миллиамперметр расположены в одном общем корпусе 6.

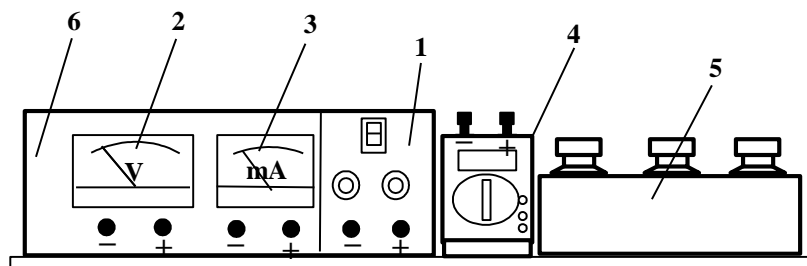


Рис. 2.2.3

Источник питания 1 имеет выключатель, выходные клеммы и две ручки регулировки напряжения – «грубо» и «точно». Около выходных клемм указана их полярность «+» и «-».

Вольтметр 2 и миллиамперметр 3 являются стрелочными измерительными приборами магнитоэлектрической системы. Они предназначены для измерения постоянных напряжений и токов, соответственно. Поэтому при включении их в электрическую цепь необходимо учитывать полярность их выводов (она указана на корпусе около клемм подключения). Положительный вывод подключается к точке схемы с большим потенциалом, отрицательный – к точке с меньшим потенциалом.

Мультиметр 4 – многопредельный комбинированный цифровой измерительный прибор. В данной работе мы будем использовать его в режимах измерения :

- постоянного напряжения – положения переключателя, обозначенные DCV;
- постоянного тока – положения переключателя, обозначенные DCA.

Выходные клеммы мультиметра продублированы на корпусе его подставки.

Магазин сопротивлений 5 – это переменный резистор, регулируемый ступенчато с большой точностью. Набор нужного сопротивления производится с помощью шести декадных переключателей. Каждый переключатель имеет десять положений (от 0 до 9), а около них указаны их множители (0,1; 1; 10; 100; 1000; 10000). Полное сопротивление, набранное на магазине, определяется как сумма произведений положений переключателей на их множители.

Для включения магазина сопротивлений в электрическую цепь используются клемма, обозначенная цифрой 0, и одна из клемм, обозначенных как $0,9\Omega$; $9,9\Omega$; $99999,9\Omega$ (эти обозначения указывают максимальное сопротивление в омах, которое можно получить при использовании данной клеммы).

Лабораторная работа состоит из двух заданий:

- 1) Изменение предела измерения миллиамперметра;
- 2) Изменение предела измерения вольтметра.

Для выполнения первого задания преподаватель должен указать вам новый предел измерения миллиамперметра I'_m . Используя данные миллиамперметра – его предел измерения I_m и его внутреннее сопротивление R_A , – по формуле (2.2.3) вы должны рассчитать необходимое шунтирующее сопротивление $R_{ш\text{ расч}}$. Затем вы должны собрать электрическую цепь, схема которой показана на рис. 2.2.4. В этой цепи в качестве эталонного амперметра $A_{\check{y}}$ используется мультиметр в режиме измерения тока; в качестве шунтирующего сопротивления $R_{ш}$ – магазин сопротивлений.

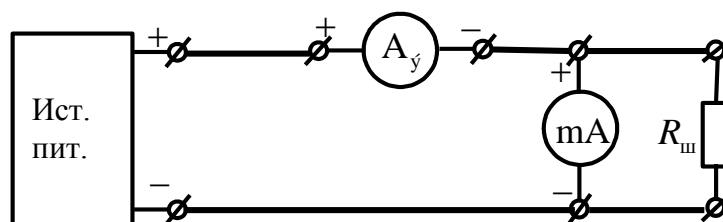


Рис. 2.2.4

После сборки цепи вы должны набрать на магазине сопротивлений расчетное сопротивление шунта и проверить, получился ли тот предел измерения, который был вам задан. Если экспериментально полученный предел измерения не совпадет с заданным, необходимо подобрать на магазине сопротивлений такое сопротивление шунта $R_{ш\text{ эксп}}$, при котором предел измерения окажется равным заданному.

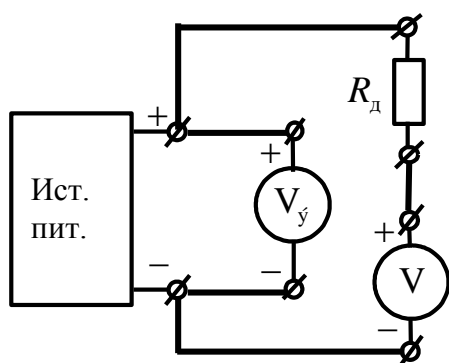


Рис. 2.2.5

Для выполнения второго задания преподаватель задает вам новый предел измерения вольтметра U'_m . По пределу измерения вольтметра U_m и его внутреннему сопротивлению R_V вы рассчитываете добавочное сопротивление $R_{д\text{ расч}}$ по формуле (2.2.6). После этого собираете цепь, схема которой показана на рис. 2.2.5. В качестве эталонного вольтметра $V_{\check{y}}$ используется мультиметр в режиме измерения напряжения, в качестве добавочного сопротивления $R_{д}$ – магазин сопротивлений.

Набрав на магазине сопротивлений расчётное добавочное сопротивление, вы должны проверить, получился ли тот предел измерения, который был вам задан. В случае несовпадения предела измерения с заданным необходимо подобрать $R_{\text{д эксп}}$, при котором предел измерения окажется равным заданному.

Порядок выполнения измерений

1. Получить от преподавателя допуск к выполнению работы и указания по значениям новых пределов измерения миллиамперметра I'_m и вольтметра U'_m . Записать их в рабочую тетрадь.

2. Ознакомиться с лабораторной установкой. Записать в рабочую тетрадь:

- предел измерения миллиамперметра I_m , его внутреннее сопротивление R_A , относительную погрешность δR_A и класс точности K_{TA} ;
- предел измерения вольтметра U_m , его внутреннее сопротивление R_V , относительную погрешность δR_V и класс точности K_{TV} ;
- классы точности мультиметра в режиме измерения тока K_{TA} и режиме измерения напряжения K_{TV} ;

3. Рассчитать сопротивление шунта $R_{\text{ш расч}}$ по формуле (2.2.3) и добавочное сопротивление $R_{\text{д расч}}$ по формуле (2.2.6).

I задание

4. При помощи соединительных проводов собрать электрическую цепь для выполнения первого задания (изменение предела измерения миллиамперметра) в соответствии с рис. 2.2.4. На этом рисунке, для наглядности, каждый проводник показан утолщенной линией.

5. Набрать на магазине сопротивлений расчетное значение сопротивления шунта $R_{\text{ш расч}}$. Выбрать предел измерения тока на мультиметре (положения, обозначенные как DCA) так, чтобы он превышал заданный вам новый предел измерения I'_m , но был близок к нему. Установить регуляторы источника питания в нулевое положение (повернув их против часовой стрелки до упора). Предъявить собранную схему преподавателю для проверки.

6. После разрешения преподавателя включить источник питания. Постепенно увеличивая напряжение источника (используя ручки «Грубо» и «Точно»), установить стрелку миллиамперметра на максимум. Записать силу тока $I'_{m \text{ эксп}}$, регистрируемую при этом мультиметром.

7. Если значение $I'_{m \text{ эксп}}$ не совпадает с заданным пределом измерения I'_m , необходимо подобрать такое сопротивление шунта $R_{\text{ш эксп}}$, при котором показания мультиметра будут равны I'_m . Записать значение $R_{\text{ш эксп}}$.

Выключить источник питания. Показать результаты преподавателю. Разобрать цепь.

II задание

8. При помощи соединительных проводов собрать электрическую цепь для выполнения второго задания (изменение предела измерения вольтметра) в соответствии с рис. 2.2.5.

9. Набрать на магазине сопротивлений расчетное значение добавочного сопротивления $R_{\text{д расч}}$. Выбрать предел измерения напряжения на мультиметре (положения, обозначенные как DCV) так, чтобы он превышал заданный вам новый предел измерения U'_m , но был близок к нему. Установить регуляторы источника питания в нулевое положение (повернув их против часовой стрелки до упора). Предъявить собранную схему преподавателю для проверки.

10. После разрешения преподавателя включить источник питания. Постепенно увеличивая напряжение источника (используя ручки «Грубо» и «Точно»), установить стрелку вольтметра на максимум. Записать напряжение $U'_{m \text{ эксп}}$, регистрируемое при этом мультиметром.

11. Если значение $U'_{m \text{ эксп}}$ не совпадает с заданным пределом измерения U'_m , необходимо подобрать такое добавочное сопротивление $R_{\text{д эксп}}$, при котором показания мультиметра будут равны U'_m . Записать значение $R_{\text{д эксп}}$. Выключить источник питания.

12. Предъявить результаты всех измерений преподавателю.

13. Разобрать электрическую цепь.

Обработка результатов измерений

I задание

1. Вычислить относительную погрешность расчетного значения сопротивления шунта по формуле

$$\delta R_{\text{ш расч}} = \sqrt{(\delta R_A)^2 + \frac{n^2}{(n-1)^2} ((\delta I'_m)^2 + (\delta I_m)^2)},$$

где $n = \frac{I'_m}{I_m}$ – коэффициент шунтирования;

δR_A – относительная погрешность внутреннего сопротивления миллиамперметра;

$\delta I'_m = \frac{K_{\text{тА}_2}}{100}$ – относительная приборная погрешность измерения силы тока I'_m

эталонным амперметром;

$\delta I_m = \frac{K_{\text{тА}_1}}{100}$ – относительная приборная погрешность измерения силы тока I_m

миллиамперметром.

2. Вычислить абсолютную погрешность расчетного значения сопротивления шунта $\Delta R_{\text{ш расч}} = R_{\text{ш расч}} \cdot \delta R_{\text{ш расч}}$.

3. Сравнить значения $\Delta R_{\text{ш расч}}$ и разности $|R_{\text{ш расч}} - R_{\text{ш эксп}}|$. Сделать вывод.

II задание

1. Вычислить относительную погрешность расчетного значения добавочного сопротивления по формуле

$$\delta R_{\text{д расч}} = \sqrt{(\delta R_V)^2 + \frac{m^2}{(m-1)^2} ((\delta U'_m)^2 + (\delta U_m)^2)},$$

где $m = \frac{U'_m}{U_m}$ – коэффициент изменения предела измерения напряжения;

δR_V – относительная погрешность внутреннего сопротивления вольтметра;

$\delta U'_m = \frac{K_{TV_2}}{100}$ – относительная приборная погрешность измерения напряжения

U'_m эталонным вольтметром;

$\delta U_m = \frac{K_{TV}}{100}$ – относительная приборная погрешность измерения напряжения

U_m вольтметром.

2. Вычислить абсолютную погрешность расчетного значения добавочного сопротивления $\Delta R_{\text{д расч}} = R_{\text{д расч}} \cdot \delta R_{\text{д расч}}$.

3. Сравнить значения $\Delta R_{\text{д расч}}$ и разности $|R_{\text{д расч}} - R_{\text{д эксп}}|$. Сделать вывод.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятиям ЭДС, напряжение. Какие участки электрической цепи называются однородными и неоднородными?
2. Сформулируйте закон Ома для участка цепи.
3. Сформулируйте I и II правила Кирхгофа. Каков порядок применения этих правил при расчете разветвленной электрической цепи. Приведите пример.
4. Покажите, что I правило Кирхгофа является следствием закона сохранения заряда, а II правило – следствием закона Ома для участка цепи.
5. Что такое амперметр? Какими параметрами он характеризуется? Какой амперметр называют идеальным?
6. Выведите формулу для расчета сопротивления шунта. Как меняется предел измерения при изменении сопротивления шунта?
7. Что такое вольтметр? Какими параметрами он характеризуется? Какой вольтметр называют идеальным?
8. Выведите формулу для расчета добавочного сопротивления. Как меняется предел измерения при изменении добавочного сопротивления?

Лабораторная работа № 2.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИСТОЧНИКА ТОКА

Цель работы: изучение зависимостей тока, полной и полезной мощностей, коэффициента полезного действия источника от сопротивления нагрузки; определение ЭДС и внутреннего сопротивления источника.

Оборудование: источник тока, амперметр, магазин сопротивлений.

Общие сведения

Источником тока называют устройство, предназначенное для создания тока в электрической цепи. В качестве источника тока может выступать гальванический элемент, аккумулятор, электронный источник питания и т.д.

При подключении источника тока к электрической цепи свободные электроны внутри проводников приходят в упорядоченное движение, т.е. возникает электрический ток, сила которого равна

$$I = \frac{dq}{dt}, \quad (2.3.1)$$

где dq – заряд, перенесенный через поперечное сечение проводника за время dt .

Силы, действующие на носители тока внутри источника, не могут быть электростатическими. Их называют сторонними силами. В качестве сторонних сил могут выступать силы вихревого электрического поля, созданного переменным магнитным полем, «химические» силы в аккумуляторах и гальванических элементах и др.

Каждый источник тока можно охарактеризовать с помощью величины, называемой электродвижущей силой (ЭДС) \mathcal{E} . По определению ЭДС равна

$$\mathcal{E} = \frac{\delta A_{\text{ст}}}{dq}, \quad (2.3.2)$$

где $\delta A_{\text{ст}}$ – работа сторонних сил, совершаемая на участке цепи при переносе заряда dq .

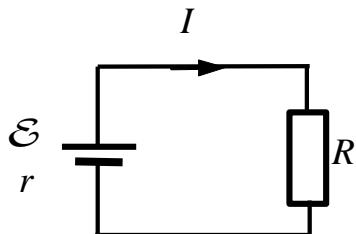


Рис. 2.3.1

Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из источника тока с ЭДС \mathcal{E} и нагрузки с сопротивлением R (рис. 2.3.1). По закону Ома для замкнутой цепи сила тока равна

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}, \quad (2.3.3)$$

где r – внутреннее сопротивление источника.

С учётом (2.3.1), (2.3.2), найдем, что работа, совершенная сторонними силами (т.е. источником) за время dt при переносе заряда dq , равна:

$$\delta A_{\text{ст}} = \mathcal{E} dq = \mathcal{E} I dt. \quad (2.3.4)$$

Мощностью называется величина, равная работе, совершаемой в единицу времени. Следовательно, мощность источника

$$P = \frac{\delta A_{\text{ст}}}{dt} = \frac{\mathcal{E} I dt}{dt} = \mathcal{E} I . \quad (2.3.5)$$

Выражая ЭДС из формулы (2.3.3), получим

$$P = I^2 (R + r) = I^2 R + I^2 r . \quad (2.3.6)$$

Таким образом, полная мощность источника P складывается из полезной мощности, выделяющейся в нагрузке,

$$P_{\text{н}} = I^2 R \quad (2.3.7)$$

и мощности, равной $I^2 r$, определяющей потери энергии в источнике.

Коэффициент полезного действия (КПД) источника равен отношению полезной мощности к полной:

$$\eta = \frac{P_{\text{н}}}{P} = \frac{I^2 R}{I^2 (R + r)} = \frac{R}{R + r} \quad (2.3.8)$$

В соответствии с (2.3.8) график зависимости КПД от сопротивления нагрузки имеет вид, показанный на рис. 2.3.2. При равенстве сопротивлений источника и нагрузки $R = r$ КПД равен 0,5 (т.е. 50%). Если $R \gg r$, то КПД асимптотически стремится к единице (т.е. к 100%).

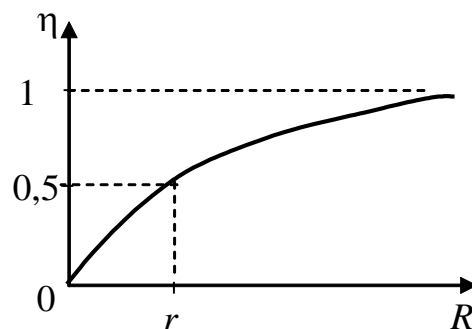


Рис. 2.3.2

Рассмотрим зависимость полезной мощности (2.3.7) от сопротивления нагрузки. Для этого в (2.3.7) подставим силу тока из (2.3.3). Получим

$$P_{\text{н}} = I^2 R = \frac{\mathcal{E}^2 R}{(R + r)^2} . \quad (2.3.9)$$

При малых сопротивлениях нагрузки $R \ll r$ (2.3.9) принимает вид

$$P_{\text{н}} \approx \frac{\mathcal{E}^2 R}{r^2} ,$$

т.е. полезная мощность пропорциональна R . При больших сопротивлениях нагрузки $R \gg r$ получим, что

$$P_{\text{н}} \approx \frac{\mathcal{E}^2}{R} ,$$

т.е. полезная мощность обратно пропорциональна R . Следовательно, график зависимости $P_{\text{н}}(R)$ должен иметь вид, показанный на рисунке 2.3.3. При некотором сопротивлении

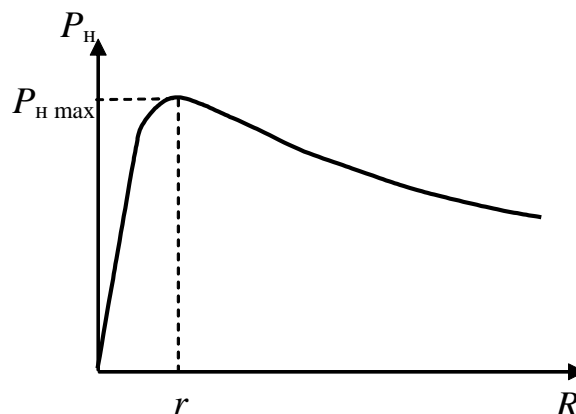


Рис. 2.3.3

нагрузки полезная мощность должна иметь максимальное значение. Найдем, при каком значении R это происходит. Для этого исследуем функцию $P_{\text{н}}(R)$ вида (2.3.9) на экстремум. Полагая \mathcal{E} и r величинами постоянными, найдем производную $\frac{dP_{\text{н}}}{dR}$. Получим

$$\frac{dP_{\text{н}}}{dR} = \frac{d}{dR} \left(\frac{\mathcal{E}^2 R}{(R+r)^2} \right) = \frac{\mathcal{E}^2 (r-R)}{(R+r)^3}.$$

В точке экстремума (в данном случае максимума) производная должна равняться нулю. Очевидно, что это произойдет при $R=r$, т.е. полезная мощность становится максимальной при равенстве сопротивлений источника и нагрузки. Такой режим работы называется режимом согласования источника и нагрузки. Мощность, выделяющаяся в нагрузке, при этом равна

$$P_{\text{н max}} = \frac{\mathcal{E}^2}{4r},$$

а КПД равен 0,5 (см. формулу (2.3.8)).

Очевидно, что с увеличением R значение КПД стремится к 1. Однако, при этом ток в нагрузке, а следовательно, и полезная мощность стремятся к нулю. Поэтому с практической точки зрения достижение η , близкого к 1, не представляет интереса.

Описание установки и метода измерений

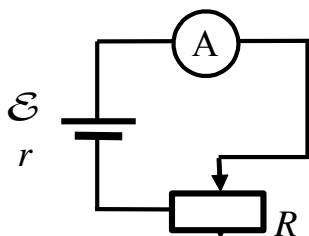


Рис. 2.3.4

Лабораторная установка состоит из источника тока, амперметра и магазина сопротивлений. Соединение приборов осуществляется по схеме, показанной на рис. 2.3.4. Сопротивление, набранное на магазине с помощью декадных переключателей, является сопротивлением нагрузки. При измерениях исследуется зависимость силы тока в цепи от сопротивления нагрузки $I(R)$. Результаты

заносятся в таблицу.

Пусть R_1 и R_2 и соответствующие им I_1 и I_2 – результаты двух измерений. На основе (2.3.3) запишем систему уравнений:

$$\begin{cases} I_1 = \frac{\mathcal{E}}{R_1 + r} \\ I_2 = \frac{\mathcal{E}}{R_2 + r} \end{cases}$$

Решая систему относительно \mathcal{E} и r , получим

$$\mathcal{E} = \frac{I_1 I_2 (R_2 - R_1)}{I_1 - I_2} \quad (2.3.10)$$

$$r = \frac{I_2 R_2 - I_1 R_1}{I_1 - I_2}$$

Таким образом, по результатам двух измерений можно вычислить ЭДС и внутреннее сопротивление источника.

Порядок выполнения измерений

1. Получить от преподавателя допуск к выполнению работы и указания по значениям сопротивления нагрузки, для которых вы будете измерять силу тока.

2. Собрать цепь по схеме на рис. 2.3.4. С помощью декадных переключателей на магазине сопротивлений установить первое значение сопротивления нагрузки. После проверки схемы преподавателем включить питание источника тока.

3. Измерить силу тока для всех заданных вам значений сопротивления нагрузки. Результаты занести в таблицу 2.3.1.

Табл. 2.3.1

№ изм.	R , Ом	I , А	P , Вт	$P_{\text{н}}$, Вт	η
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

4. Выключить питание источника. Предъявить результаты измерений преподавателю.

Обработка результатов измерений

1. Вычислить ЭДС \mathcal{E} и внутреннее сопротивление источника r по формулам (2.3.10) для трех пар результатов измерений I и R . Для расчетов рекомендуется брать не соседние результаты.

2. Найти средние значения $\langle \mathcal{E} \rangle$, $\langle r \rangle$, абсолютные погрешности $\Delta \mathcal{E}$ и Δr по методу Корнфельда. Вычислить относительные погрешности $\delta \mathcal{E}$, δr . (см. Приложение 2)

3. Записать окончательный результат в виде

$$\mathcal{E} = \langle \mathcal{E} \rangle \pm \Delta \mathcal{E} = \dots, \text{ В}$$

$$\delta \mathcal{E} = \dots, P =$$

$$r = \langle r \rangle \pm \Delta r = \dots, \text{ Ом}$$

$$\delta r = \dots, P =$$

5. Рассчитать P , P_n и η для всех значений R по формулам (2.3.5), (2.3.7) и (2.3.8), соответственно. Результаты занести в таблицу.

6. Построить графики зависимостей $I(R)$, $P(R)$, $P_n(R)$, $\eta(R)$, откладывая по горизонтальной оси сопротивление нагрузки R .

Контрольные вопросы

1. Что такое «сила тока», «ЭДС»? В каких единицах они измеряются?
2. Сформулируйте закон Ома для замкнутой цепи.
3. Обоснуйте формулу для расчета полной мощности источника $P = \mathcal{E}I$.
4. Изобразите график зависимости $P_n(R)$. Поясните, почему при некотором сопротивлении нагрузки полезная мощность должна быть максимальной.
5. Выведите условие согласования источника и нагрузки. Чему равна полезная мощность в режиме согласования?
6. Дайте определение КПД источника и получите для него расчетную формулу. Изобразите график зависимости $\eta(R)$. Чему равен КПД в режиме согласования?
7. Почему достижение КПД источника, близкого к единице, не имеет практического значения?
8. Поясните метод расчета \mathcal{E} и r по результатам измерений.

Лабораторная работа № 2.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Цель работы: изучение природы электропроводности вещества, исследование зависимости сопротивления металлов и полупроводников от температуры.

Оборудование: измерительный блок, термостат с исследуемыми образцами проводников.

Общие сведения

Вещество обладает **электропроводностью** – способностью проводить электрический ток. Степень электропроводности определяется значением удельного сопротивления. По закону Ома в дифференциальной форме плотность тока

$$\vec{j} = \frac{\vec{E}}{\rho}, \quad (2.4.1)$$

где \vec{E} – напряженность электрического поля, ρ – удельное сопротивление. Чем меньше удельное сопротивление, тем больше плотность тока при данном значении напряженности поля, т.е. тем выше электропроводность.

Наилучшими проводниками тока являются металлы, обладающие малым удельным сопротивлением ($10^{-8} \div 10^{-6}$) Ом·м. Диэлектрики практически не проводят ток, так как их удельное сопротивление очень велико: ($10^8 \div 10^{18}$) Ом·м. Промежуточное положение по электропроводности занимают полупроводники. Их удельное сопротивление ($10^{-6} \div 10^8$) Ом·м.

Металлы и полупроводники обладают разной температурной зависимостью удельного сопротивления. У металлов с ростом температуры удельное сопротивление увеличивается, а у полупроводников – уменьшается.

Металлы. Рассмотрим основные положения теории электропроводности металлов. Электрический ток – это направленное движение заряженных частиц. Для его существования необходимо наличие носителей тока, т.е. частиц, которые могли бы свободно перемещаться под действием электрического поля. В металлах носителями тока являются свободные электроны. Так называют электроны, которые отрываются от атомов и могут относительно свободно перемещаться по всему объему металла.

При отсутствии внешнего электрического поля свободные электроны движутся хаотично, сталкиваясь с нарушениями кристаллической решетки металла. Это движение можно характеризовать средней скоростью теплового

движения $\langle v_t \rangle$. Если создать электрическое поле в металле, то одновременно с тепловым движением возникнет также направленное движение свободных электронов (дрейф). Направленное движение характеризуют средней скоростью дрейфа $\langle v_{др} \rangle$. Этому движению препятствуют столкновения с нарушениями кристаллической решетки. Чем больше напряженность электрического поля, тем больше скорость дрейфа:

$$\langle \vec{v}_{др} \rangle = \beta \vec{E}, \quad (2.4.2)$$

где β – коэффициент пропорциональности, называемый подвижностью.

Как известно, плотность тока \vec{j} может быть выражена через параметры носителей тока:

$$\vec{j} = en \langle \vec{v}_{др} \rangle, \quad (2.4.3)$$

где e – заряд носителей, n – концентрация носителей тока.

Используя (2.4.2), получим для плотности тока выражение

$$\vec{j} = en\beta \vec{E}. \quad (2.4.4)$$

Это выражение есть не что иное, как закон Ома в дифференциальной форме (2.4.1). Следовательно, удельное сопротивление металла

$$\rho = \frac{1}{en\beta}. \quad (2.4.5)$$

Объяснение температурной зависимости сопротивления металлов дала квантовая теория электропроводности. Согласно этой теории, подвижность

$$\beta = \frac{e \langle \lambda_{\phi} \rangle}{m \langle v_{тф} \rangle}, \quad (2.4.6)$$

где $\langle \lambda_{\phi} \rangle$ – средняя длина свободного пробега электрона, обладающего энергией Ферми; m – масса электрона; $\langle v_{тф} \rangle$ – средняя скорость теплового движения электрона, обладающего энергией Ферми. Подставив (2.4.6) в (2.4.5), получим

$$\rho = \frac{m \langle v_{тф} \rangle}{e^2 n \langle \lambda_{\phi} \rangle}. \quad (2.4.7)$$

Из всех величин в правой части этой формулы от температуры зависит только $\langle \lambda_{\phi} \rangle$, т.е. среднее расстояние, проходимое электроном между столкновениями. Чем выше температура, тем больше амплитуда колебаний ионов кристаллической решетки, следовательно, меньше длина свободного пробега. Поэтому $\langle \lambda_{\phi} \rangle$ обратно пропорциональна термодинамической температуре, т.е. $\langle \lambda_{\phi} \rangle \sim \frac{1}{T}$, а удельное сопротивление прямо пропорционально температуре $\rho \sim T$. Если использовать шкалу Цельсия, то зависимость удельного сопротивления от температуры принимает вид

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t), \quad (2.4.8)$$

где ρ – удельное сопротивление при температуре t , ρ_0 – удельное сопротивление при температуре 0°C , α – температурный коэффициент сопротивления. Взяв производную по температуре от выражения (2.4.8) можно показать, что

$$\alpha = \frac{1}{\rho_0} \frac{d\rho}{dt},$$

т.е. α характеризует быстроту изменения удельного сопротивления при изменении температуры. Можно определить α как величину, равную относительному приращению удельного сопротивления при нагревании на один $^\circ\text{C}$.

Для всех чистых металлов температурный коэффициент сопротивления близок к величине, равной $\frac{1}{273} \approx 3,67 \cdot 10^{-3} (^\circ\text{C})^{-1}$. Например, в интервале температур $(0 \div 100)^\circ\text{C}$ среднее значение α равно: у серебра $4 \cdot 10^{-3} (^\circ\text{C})^{-1}$, у меди $4,3 \cdot 10^{-3} (^\circ\text{C})^{-1}$, у алюминия $3,8 \cdot 10^{-3} (^\circ\text{C})^{-1}$, у цинка $3,7 \cdot 10^{-3} (^\circ\text{C})^{-1}$, у олова $4,5 \cdot 10^{-3} (^\circ\text{C})^{-1}$.

Линейная зависимость сопротивления металлов от температуры экспериментально подтверждается в довольно широком интервале температур. Но при низких температурах, близких к абсолютному нулю, такая зависимость нарушается. У большинства металлов удельное сопротивление выходит на уровень, так называемого, остаточного сопротивления $\rho_{\text{ост}}$. У некоторых металлов, называемых сверхпроводниками, при низких температурах удельное сопротивление становится равным нулю.

Полупроводники. При температуре абсолютного нуля чистый полупроводник не проводит электрический ток, так как в нем нет носителей тока. Это означает, что все электроны связаны со своими атомами. При $T \neq 0$ часть электронов отрывается от атомов и приобретает возможность перемещаться по всему объему полупроводника. С точки зрения зонной теории такой отрыв электронов рассматривается как переход их из валентной зоны в зону проводимости (рис. 2.4.1). На освободившиеся уровни

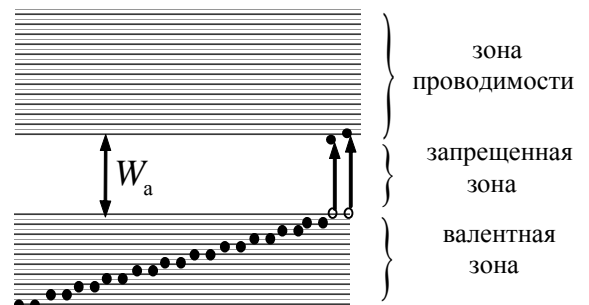


Рис.2.4.1

в валентной зоне могут переходить электроны с более низких энергетических уровней. Направленное движение электронов, находящихся в валентной зоне, можно рассматривать как движение квазичастиц «дырок». «Дырке» приписывают положительный элементарный заряд $+e$. Таким образом,

электрический ток в полупроводнике имеет две составляющие: электронную и дырочную.

Для перехода из валентной зоны в зону проводимости электрон должен преодолеть запрещенную зону шириной W_a . Эту энергию называют также энергией активации. Вероятность таких переходов пропорциональна $e^{-\frac{W_a}{2kT}}$, где e – основание натурального логарифма, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, T – термодинамическая температура.

Удельное сопротивление полупроводника описывается выражением, подобным выражению для удельного сопротивления металла (2.4.5), но с учетом наличия в полупроводнике двух видов носителей тока – электронов и дырок:

$$\rho = \frac{1}{e(n_+ \beta_+ + n_- \beta_-)}, \quad (2.4.9)$$

где n_+, n_- – концентрации дырок и электронов, соответственно, β_+, β_- – их подвижности. Зависимость подвижности носителей тока в полупроводниках от температуры аналогична температурной зависимости подвижности электронов в металлах. Но в полупроводниках концентрация носителей тока также зависит от температуры. И n_+ и n_- определяются вероятностью переходов электронов из валентной зоны в зону проводимости.

Следовательно, они пропорциональны $e^{-\frac{W_a}{2kT}}$. Зависимость концентрации от температуры оказывается более резкой, чем температурная зависимость подвижности. Поэтому удельное сопротивление полупроводника зависит от температуры по экспоненциальному закону:

$$\rho = \rho_\infty e^{\frac{W_a}{2kT}}, \quad (2.4.10)$$

где ρ_∞ – постоянная для данного полупроводника величина, формально равная удельному сопротивлению при бесконечно большой температуре.

Энергия активации для чистых полупроводников равна десятым долям – единицам эВ. Например, для олова Sn $W_a = 0,1$ эВ, для сурьмы Sb $W_a = 0,36$ эВ, для германия Ge $W_a = 0,72$ эВ, для кремния Si $W_a = 1,1$ эВ, для селена Se $W_a = 2,5$ эВ.

Описание установки и метода измерений

Лабораторная установка состоит из измерительного блока 1 и термостата 2 (рис. 2.4.2), внутри которого расположены нагреватель и исследуемые образцы проводников. Измерительный блок состоит из электронного термометра 3 и омметра 4. Включение измерительного блока производится тумблером 5.

Для включения нагревателя на блоке имеется кнопка 6. О том, что нагреватель включен, сигнализирует светодиод над кнопкой 6. Для выключения нагревателя необходимо повторно нажать кнопку 6.

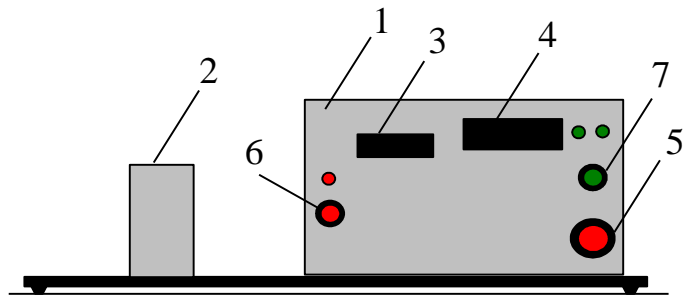


Рис.2.4.2

Кнопка 7 служит для поочередного подключения исследуемых образцов к омметру. Над ней расположены два светодиода, которые сигнализируют о том, какой из образцов подключен к омметру, металлический или полупроводниковый. Подключение образцов производится повторными нажатиями кнопки 7.

Измерительный блок соединен с термостатом при помощи проводов, проложенных под основанием лабораторной установки (на рисунке не показаны).

В данной работе исследуются температурные зависимости сопротивления металла и полупроводника. Как известно, сопротивление однородного проводника постоянного поперечного сечения равно

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (2.4.11)$$

где ρ – удельное сопротивление, l – длина проводника, S – площадь поперечного сечения проводника. Как видим, сопротивление пропорционально удельному сопротивлению. Поэтому температурная зависимость сопротивления будет такой же, как зависимость удельного сопротивления от температуры. Поэтому для металла

$$R = R_0 (1 + \alpha t), \quad (2.4.12)$$

а для полупроводника

$$R = R_\infty e^{\frac{W_a}{2kT}}. \quad (2.4.13)$$

Зная сопротивление при разных температурах, можно рассчитать температурный коэффициент сопротивления для металла и энергию активации для полупроводника.

Металл. Запишем выражение (2.4.12) для двух значений температуры:

$$\begin{cases} R_1 = R_0 (1 + \alpha t_1) \\ R_2 = R_0 (1 + \alpha t_2) \end{cases}$$

Решая эту систему уравнений относительно α , получим

$$\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1 t_2 - R_2 t_1}. \quad (2.4.14)$$

Полупроводник. Представим выражение (2.4.13) в виде

$$\frac{R}{R_{\infty}} = e^{\frac{W_a}{2kT}}$$

и прологарифмируем его:

$$\ln \frac{R}{R_{\infty}} = \frac{W_a}{2kT}. \quad (2.4.15)$$

Запишем выражение (2.4.15) для двух значений температуры:

$$\begin{cases} \ln \frac{R_1}{R_{\infty}} = \frac{W_a}{2kT_1} \\ \ln \frac{R_2}{R_{\infty}} = \frac{W_a}{2kT_2} \end{cases}.$$

Вычтем из первого уравнения второе:

$$\ln \frac{R_1}{R_{\infty}} - \ln \frac{R_2}{R_{\infty}} = \ln \frac{R_1}{R_2} = \frac{W_a}{2k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right).$$

Тогда энергия активации

$$W_a = 2k \frac{\ln \frac{R_1}{R_2}}{\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)} = 2k \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \ln \frac{R_1}{R_2}. \quad (2.4.16)$$

Порядок выполнения измерений

1. Получить у преподавателя допуск к выполнению работы.
2. Ознакомиться с органами управления измерительного блока.
3. Включить питание измерительного блока. Измерить сопротивление исследуемых образцов при комнатной температуре. Результат записать в таблицу 2.4.1.

Табл. 2.4.1

№ изм.	металл		полупроводник		
	$t, ^\circ\text{C}$	$R, \text{Ом}$	$t, ^\circ\text{C}$	T, K	$R, \text{Ом}$
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

4. Включить нагреватель термостата. Измерить сопротивление образцов при нагревании с интервалом $(8 - 10) ^\circ\text{C}$. Результаты записать в таблицу.

5. Выключить питание измерительного блока. Результаты измерений предъявить преподавателю.

Обработка результатов измерений

1. Для каждого значения сопротивления полупроводника вычислить температуру по шкале Кельвина $T = t + 273$. Результаты вычислений занести в табл. 2.4.1.

2. Построить графики зависимостей $R(t)$ для металла и $R(T)$ для полупроводника. При построении графиков масштабы по осям выбрать так, чтобы графики охватывали всю отведенную для них площадь.

3. Используя формулу (2.4.14), три раза вычислить температурный коэффициент сопротивления α для металла. В качестве R_1 и R_2 рекомендуется брать не соседние значения.

4. Используя полученные значения α , вычислить $\langle \alpha \rangle$, оценить абсолютную погрешность $\Delta\alpha$, считая ее равной случайной погрешности, вычислить относительную погрешность $\delta\alpha$ по методу Корнфельда (см. Приложение 2).

5. Записать окончательный результат для температурного коэффициента сопротивления в виде

$$\alpha = \langle \alpha \rangle \pm \Delta\alpha = \dots\dots\dots, (^\circ\text{C})^{-1}.$$

$$\delta\alpha = \dots\dots\dots, P = \dots\dots\dots$$

6. Используя формулу (2.4.16), три раза вычислить энергию активации W_a для полупроводника. В качестве R_1 и R_2 рекомендуется брать не соседние значения.

7. Перевести полученные значения энергии активации из джоулей в электрон-вольты, учитывая, что $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$. В последующих расчетах использовать значения энергии активации в электрон-вольтах.

7. Вычислить среднее значение $\langle W_a \rangle$, абсолютную погрешность, $\Delta(W_a)$, относительную погрешность δW_a по методу Корнфельда.

8. Записать окончательный результат для энергии активации в виде

$$W_a = \langle W_a \rangle \pm \Delta W_a = \dots\dots\dots, \text{ эВ}$$

$$\delta W_a = \dots\dots\dots, P = \dots\dots\dots$$

9. Сделайте выводы по результатам вычислений.

Контрольные вопросы

1. Что такое электропроводность? Каковы типичные значения удельного сопротивления для металлов, полупроводников и диэлектриков?
2. Как удельное сопротивление металла зависит от температуры? Поясните смысл температурного коэффициента сопротивления. Как рассчитать температурный коэффициент сопротивления, зная сопротивления при двух значениях температуры?
3. Объясните, почему удельное сопротивление металлов растет с повышением температуры.
4. Объясните температурную зависимость удельного сопротивления полупроводников.
5. Что такое энергия активации электронов полупроводника? Как рассчитать энергию активации, зная сопротивления полупроводника при двух значениях температуры?
6. Изобразите зонные схемы металла, диэлектрика, полупроводника. Поясните, в чем их различие.

Приложение 1

Инструментальные (приборные) погрешности

а) Класс точности задан числом, обведенным кружком.

В этом случае одинаковой при всех показаниях измерительного прибора остается относительная погрешность. Число в кружке и есть относительная инструментальная погрешность, выраженная в процентах:

$K_t = \frac{\Delta A_{ин}}{A_{из}} \cdot 100$, где $A_{из}$ – результат измерения. Поэтому абсолютная инструментальная погрешность такого прибора

$$\Delta A_{ин} = \frac{K_t \cdot A_{из}}{100}. \quad (П.1.1)$$

б) **Класс точности задан числом без кружка.** В этом случае при всех измерениях в пределах одного диапазона постоянной остается абсолютная инструментальная погрешность. Класс точности такого прибора выражает относительную инструментальную погрешность в процентах для результата

измерений равного пределу диапазона A_{max} : $K_t = \frac{\Delta A_{ин}}{A_{max}} \cdot 100$. Поэтому абсолютная инструментальная погрешность найдется как

$$\Delta A_{ин} = \frac{K_t \cdot A_{max}}{100}. \quad (П.1.2)$$

в) В тех случаях, когда на приборе **класс точности не указан**, *абсолютная инструментальная погрешность принимается равной половине цены наименьшего деления*. Например, при измерении длины линейкой с миллиметровыми делениями инструментальную погрешность необходимо считать равной 0,5 мм.

Для приборов, оснащенных нониусом, за инструментальную погрешность принимают цену деления нониуса (для штангенциркуля – 0,1 или 0,05 мм, для микрометра – 0,01 мм).

Приложение 2

Порядок обработки результатов прямых измерений

1. В качестве оценки истинного значения измеряемой величины A принять: при однократном измерении – результат этого измерения; при многократных измерениях – среднее арифметическое результатов всех измерений

$$A_{\text{из}} = \langle A \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i. \quad (\text{П.2.1})$$

2. Для многократных измерений вычислить случайную абсолютную погрешность

$$\Delta A_{\text{сл}} = t_{P,n} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - \langle A \rangle)^2}{n(n-1)}}. \quad (\text{П.2.2})$$

Коэффициент Стьюдента $t_{P,n}$ определить по таблице П.2.1. Доверительная вероятность, как правило, принимается равной 0,95. Для однократного измерения $\Delta A_{\text{сл}} = 0$.

Табл. П.2.1. Коэффициенты Стьюдента $t_{P,n}$ для некоторых значений n и P
(n – число измерений, P – доверительная вероятность)

$n \backslash P$	0,7	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99	0,999
2	2,0	3,1	6,3	12,7	31,8	63,7	636,6
3	1,3	1,9	2,9	4,3	7,0	9,9	31,6
4	1,3	1,6	2,4	3,2	4,5	5,8	12,9
5	1,2	1,5	2,1	2,8	3,7	4,6	8,7
6	1,2	1,5	2,0	2,6	3,4	4,0	6,9
7	1,1	1,4	1,9	2,4	3,1	3,7	6,0
8	1,1	1,4	1,9	2,4	3,0	3,5	5,4
9	1,1	1,4	1,9	2,3	2,9	3,4	5,0
10	1,1	1,4	1,8	2,3	2,8	3,3	4,8
20	1,1	1,3	1,7	2,1	2,5	2,9	3,9
∞	1,0	1,3	1,6	2,0	2,3	2,6	3,3

3. По классу точности измерительного прибора найти инструментальную погрешность $\Delta A_{\text{ин}}$. Если это возможно, оценить методическую погрешность $\Delta A_{\text{мт}}$ и рассчитать систематическую абсолютную погрешность $\Delta A_{\text{сист}} = \sqrt{(\Delta A_{\text{ин}})^2 + (\Delta A_{\text{мт}})^2}$. Если оценить методическую погрешность не представляется возможным, то считать систематическую погрешность равной инструментальной.

4. Найти абсолютную погрешность

$$\Delta A = \sqrt{(\Delta A_{\text{сл}})^2 + (\Delta A_{\text{сист}})^2}. \quad (\text{П.2.3})$$

Если одна из погрешностей составляет менее 1/3 от другой, то ею можно пренебречь.

5. Рассчитать относительную погрешность

$$\delta A = \frac{\Delta A}{A_{\text{из}}} \quad (\text{П.2.4})$$

и выразить её в процентах.

6. Записать окончательный результат в виде

$$A = A_{\text{из}} \pm \Delta A \quad (\text{П.2.5})$$

с указанием размерности измеряемой величины. Здесь же привести значение относительной погрешности δA . При записи результата: абсолютную ΔA и относительную δA погрешности округлить до одной или двух значащих цифр (если первая значащая цифра – 1 или 2); величину $A_{\text{из}}$ округлить так, чтобы разряд ее последней значащей цифры совпал с разрядом последней значащей цифры абсолютной погрешности.

Упрощенный метод обработки результатов прямых многократных измерений (метод Корнфельда)

1. В качестве оценки истинного значения измеряемой величины A принять полусумму максимального и минимального из результатов измерений:

$$A_{\text{из}} = \frac{A_{\text{max}} + A_{\text{min}}}{2}. \quad (\text{П.2.6})$$

2. Вычислить случайную абсолютную погрешность как полуразность максимального и минимального из результатов измерений:

$$\Delta A_{\text{сл}} = \frac{A_{\text{max}} - A_{\text{min}}}{2}. \quad (\text{П.2.7})$$

Доверительная вероятность в методе Корнфельда зависит от числа измерений n :

$$P = 1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{n-1}. \quad (\text{П.2.8})$$

Остальные расчеты делаются так же, как в предыдущем случае (см. пп. 3 –6).