

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

А. В. Казаков

ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СО- ПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

Методические указания по выполнению
компьютерной лабораторной работы
для студентов всех специальностей

Томск
2020

УДК 537.311.31
ББК 22.3
К 140

Рецензент
Немирович-Данченко Л. Ю., ст. преподаватель

Одобрено на заседании каф. физики, протокол № 15 от 15.03.2019.

Казаков, Андрей Викторович
К 140 Измерение удельного электрического сопротивления металлов : метод. указания по выполнению лабораторной работы / А. В. Казаков, – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2020. – 17 с.

Представлена краткая теория по разделу физики «Постоянный электрический ток». Показано влияние схемы подключения амперметра и вольтметра на точность измерения сопротивления проводника. Описана экспериментальная установка для определения удельного сопротивления, основанного на законе Ома, а также методика проведения измерений и обработки результатов.

Для студентов ТУСУРа, обучающихся по техническим направлениям подготовки и специальностям.

УДК 537.311.31
ББК 22.3

© Казаков А. В., 2020
© Томск. гос. ун-т систем упр.
и радиоэлектроники, 2020

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
1 КРАТКАЯ ТЕОРИЯ.....	4
2 МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ.....	7
3 ЗАДАНИЕ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ	10
4 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	13
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	14

ВВЕДЕНИЕ

Целью данной лабораторной работы является изучение электрических свойств проводников на примере измерения удельного сопротивления различных металлических сплавов.

1 КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Электрическим током называется любое упорядоченное (направленное) движение электрических зарядов. Электрический ток может протекать в среде, обладающей проводящими свойствами, т.е. содержащей носители заряда, которые имеют возможность движения (свободные заряды). В металлах и металлических сплавах такими носителями являются электроны, в электролитах – ионы (катионы и анионы), в газах – ионы и электроны, в полупроводниках – электроны или дырки (электронно-дырочная проводимость). Исторически принято, что за направление протекания электрического тока обычно принимают направление движения положительных зарядов. При этом, если ток создается отрицательно заряженными частицами (например, электронами), то направление электрического тока противоположно направлению движения заряженных частиц. Количественной характеристикой электрического тока является **сила тока** I . Сила тока I есть величина, равная заряду, переносимому через поперечное сечение проводника в единицу времени. Если за время dt переносится заряд dq , то сила тока I по определению равна

$$I = \frac{dq}{dt}. \quad (1.1)$$

Электрический ток, сила и направление которого не изменяются с течением времени, называется **постоянным током**.

Электрический ток может быть распределён неравномерно по сечению проводника, через который он протекает. Поэтому более детально ток характеризуется вектором **плотности тока** \vec{j} . Модуль вектора плотности тока j численно равен отношению силы тока dI через элементарную площадку dS , перпендикулярную направлению движения носителей заряда, к ее площади:

$$|\vec{j}| = \frac{dI}{dS}. \quad (1.2)$$

В практически важных случаях, когда постоянные электрические токи протекают по тонким однородным проводникам, направление тока будет совпадать с направлением оси провода, а величина плотности тока j может считаться одинаковой во всех точках его поперечного сечения. Тогда плотность тока можно найти как

$$j = \frac{I}{S}, \quad (1.3)$$

где I – сила постоянного тока;

S – площадь поперечного сечения проводника.

Для того чтобы поддерживать ток в цепи достаточно долго, необходимо осуществлять движение зарядов по замкнутой траектории. Следовательно, в замкнутой цепи должны быть участки, на которых носители заряда будут двигаться против сил электростатического поля. Например, для положительно заряженных частиц – от точек с меньшим потенциалом к точкам с большим потенциалом. Это возможно лишь при наличии не электростатических сил, называемых **сторонними силами**. Таким образом, постоянный электрический ток создаётся и поддерживается сторонними силами, которые могут иметь химическую, электромагнитную, механическую или иную (например, радиоактивную) природу. Величина, равная работе A сторонних сил

по перемещению единичного положительного заряда q , называется **электродвижущей силой** (ЭДС), действующей в цепи:

$$\varepsilon = \frac{A}{q}. \quad (1.4)$$

Работу сторонних сил на некотором участке электрической цепи (проводника) 1–2 можно найти как

$$A_{12} = \int_1^2 \vec{F}_{\text{ст}} d\vec{l} = q \int_1^2 \vec{E}_{\varepsilon} \cdot d\vec{l}, \quad (1.5)$$

где $\vec{F}_{\text{ст}} = \vec{E}_{\varepsilon} \cdot q$ – сторонняя сила;

\vec{E}_{ε} – напряжённость поля сторонних сил;

$d\vec{l}$ – элемент цепи (проводника).

Отсюда ЭДС на некотором участке цепи 1–2:

$$\varepsilon_{12} = \frac{A_{12}}{q} = \int_1^2 \vec{E}_{\varepsilon} \cdot d\vec{l}. \quad (1.6)$$

Для замкнутой цепи (контура) длиной l :

$$\varepsilon = \oint_l \vec{E}_{\varepsilon} \cdot d\vec{l}. \quad (1.7)$$

В результате перемещения заряженных частиц под действием сторонних сил, внутри проводника возникнет собственное отличное от нуля электрическое поле. Электрическое поле E постоянного тока создается зарядами, находящимися на поверхности проводника, плотность которых не меняется со временем, несмотря на то, что происходит движение зарядов: на место ушедших зарядов приходит такое же количество новых зарядов. Поэтому, как и поле неподвижных зарядов, поле постоянного тока E является потенциальным (электростатическим).

Величина, численно равная работе A_{12} , совершаемой электростатическими и сторонними силами при перемещении единичного положительного заряда из точки 1 в точку 2 электрической цепи (или проводника), называется **падением напряжения** или просто **напряжением** U_{12} на участке цепи 1–2:

$$U_{12} = \int_1^2 \vec{E} \cdot d\vec{l} + \int_1^2 \vec{E}_{\varepsilon} \cdot d\vec{l} = \int_1^2 \vec{E} \cdot d\vec{l} + \varepsilon_{12}. \quad (1.8)$$

Из связи напряжённости поля E с потенциалом следует:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 \vec{E} \cdot d\vec{l}, \quad (1.9)$$

где φ_1 и φ_2 – потенциалы в точках 1 и 2 цепи соответственно.

Тогда выражение (1.8) можно записать следующим образом:

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}. \quad (1.10)$$

Если на рассматриваемом участке цепи нет ЭДС (т.е. $\varepsilon_{12} = 0$), то напряжение U_{12} на концах участка цепи 1–2 совпадает с разностью потенциалов:

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2. \quad (1.11)$$

В изотропной проводящей среде плотность тока j связана с напряжённостью электрического поля E в данной точке по закону Ома (закон Ома в дифференциальной форме):

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}, \quad (1.12)$$

где коэффициент пропорциональности σ – удельная проводимость.

Удельной проводимостью (удельной электропроводностью) называют меру способности вещества проводить электрический ток.

Величина, обратная удельной проводимости, называется удельным сопротивлением ρ :

$$\rho = \frac{1}{\sigma}. \quad (1.13)$$

Удельное сопротивление (удельное электрическое сопротивление) ρ – это физическая величина, которая характеризует способность материала (вещества) препятствовать прохождению электрического тока. В системе СИ измеряется в Ом·м. Удельное сопротивление является одной из важнейших характеристик, определяющих электрические свойства веществ. Именно по величине удельного сопротивления ρ все вещества делятся на проводники, полупроводники и диэлектрики. Удельное сопротивление ρ при нормальных условиях:

- для проводников составляет менее 10^{-5} Ом·м,
- диэлектриков – более 10^8 Ом·м,
- полупроводников равно 10^{-5} – 10^8 Ом·м.

Удельное сопротивление не зависит от геометрических размеров образца, а определяется только свойствами и состоянием (в первую очередь – температурой T) вещества, из которого изготовлен образец.

С учетом выражений (1.3), (1.12) и (1.13) для однородного участка цепи без ЭДС (или однородного проводника) можно записать:

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 \vec{E}_e \cdot d\vec{l} = \int_1^2 \frac{\vec{j}}{\sigma} d\vec{l} = \int_1^2 \frac{\rho \cdot I}{S} dl. \quad (1.14)$$

Электрическое сопротивление R является собственной характеристикой проводника и определяется его размерами, формой и материалом, из которого он изготовлен. Электрическое сопротивление R однородного проводника связано с удельным сопротивлением ρ , следующим выражением:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S}, \quad (1.15)$$

где L – длина;

S – площадь поперечного сечения проводника.

Падение напряжения U_R на однородном проводнике длиной L с площадью поперечного сечения S и удельным сопротивлением ρ можно найти как

$$U_R = \varphi_0 - \varphi_L = \int_0^L \frac{I \cdot \rho}{S} dl = \frac{I \cdot \rho \cdot L}{S}. \quad (1.16)$$

С учетом выражения (1.15) окончательно получаем:

$$U_R = I \cdot R. \quad (1.17)$$

Из выражения (1.17) следует, что напряжение U_R на концах проводника прямо пропорционально протекающей в нем силе тока I , а сопротивление проводника R является коэффициентом пропорциональности между этими величинами. Выражение (1.17) представляет собой закон Ома (в интегральной форме) для однородного участка цепи, не содержащего ЭДС.

2 МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Достаточно точным методом измерения сопротивлений является метод моста постоянного тока (моста Уитстона). Точность этого метода определяется точностью изготовления эталонных сопротивлений, с которыми сравнивается измеряемое сопротивление. В настоящей работе рассмотрим более простой метод измерения сопротивления R , основанный на законе Ома, не требующий специальных приборов, кроме амперметра и вольтметра.

В ходе выполнения настоящей лабораторной работы необходимо определить удельные сопротивления двух проводников. В качестве проводников используются проволоки из различных металлических сплавов с круглой формой поперечного сечения, т.е. проводники, имеющие цилиндрическую форму. Поэтому для определения площади поперечного сечения S достаточно измерить диаметр d образца. Тогда, экспериментально определив сопротивление R , можно рассчитать удельное сопротивление ρ как

$$\rho = \frac{R \cdot S}{L} = \frac{R \cdot \pi \cdot d^2}{4L}. \quad (2.1)$$

Измерить сопротивление R проводника можно, пользуясь одной из схем, представленных на рисунке 2.1.

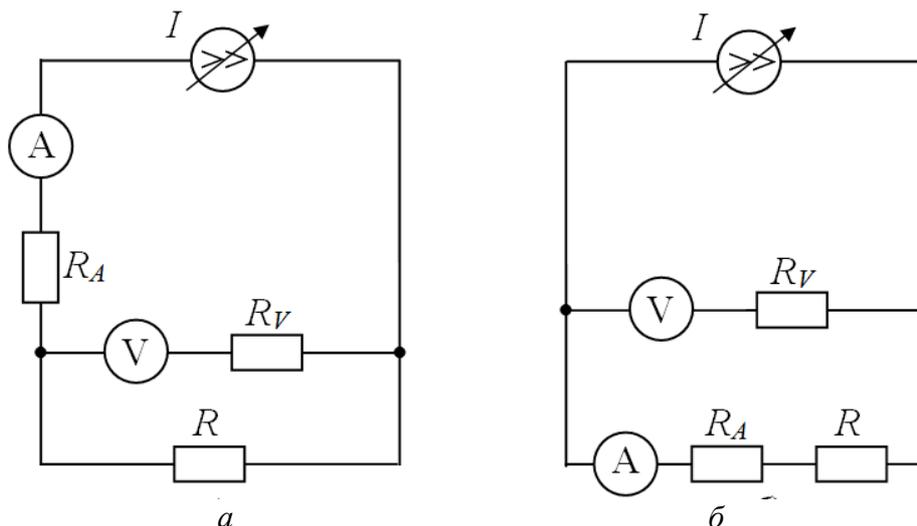


Рисунок 2.1 – Схема для измерения сопротивлений:

I – регулируемый источник постоянного тока; R_A – внутреннее сопротивление амперметра; R_V – внутреннее сопротивление вольтметра;
 R – измеряемое сопротивление проволоки;
 A – амперметр; V – вольтметр

Пусть напряжение U_{R1} и сила тока I_1 – это показания вольтметра и амперметра в схеме, представленной на рисунке 2.1,а, а напряжение U_{R2} и сила тока I_2 – показания приборов в схеме, представленной на рисунке 2.1,б. В любом случае, измерив напряжение и ток, можно рассчитать сопротивление:

$$R_1 = \frac{U_{R1}}{I_1}, \quad (2.2)$$

$$R_2 = \frac{U_{R2}}{I_2}. \quad (2.3)$$

Значения R_1 и R_2 будут отличаться друг от друга из-за влияния внутренних сопротив-

лений амперметра R_A и вольтметра R_V . Найдем связь между искомым значением R и полученными значениями R_1 и R_2 .

В схеме, представленной на рисунке 2.1,*а*, вольтметр правильно измеряет падение напряжения на концах проволоки, а амперметр измеряет силу токов, проходящих через проволоку и через вольтметр.

Обозначим I_1^* силу тока, протекающего через искомое сопротивление R , а I_V – силу тока через вольтметр. Согласно правилам Кирхгофа:

$$I_1 = I_1^* + I_V, \quad (2.4)$$

$$I_1^* \cdot R = I_V \cdot R_V. \quad (2.5)$$

Выражая из (2.4) ток I_V , получим:

$$I_1^* \cdot R = (I_1 - I_1^*) \cdot R_V = I_1 \cdot R_V - I_1^* \cdot R_V. \quad (2.6)$$

Отсюда I_1^* :

$$I_1^* = \frac{I_1 \cdot R_V}{R + R_V}. \quad (2.7)$$

Падение напряжения на сопротивлении вольтметра R_V ($U_V = U_{R1}$):

$$U_{R1} = I_V \cdot R_V = I_1 \cdot R_V - I_1^* \cdot R_V. \quad (2.8)$$

Подставив в (2.8) выражение для тока I_1^* (2.7), получим:

$$U_{R1} = I_1 \cdot R_V - \frac{I_1 \cdot R_V^2}{R + R_V} = I_1 \cdot R_V \cdot \left(1 - \frac{R_V}{R + R_V}\right). \quad (2.9)$$

Подставим (2.9) в выражение (2.1):

$$R_1 = \frac{U_{R1}}{I_1} = R_V \cdot \left(1 - \frac{R_V}{R + R_V}\right) = \frac{R \cdot R_V}{R + R_V}. \quad (2.10)$$

Выразим из (2.10) R и, воспользовавшись разложением в ряд Тейлора (ограничимся двумя первыми слагаемыми), окончательно получим:

$$R = \frac{R_1}{1 - \frac{R_1}{R_V}} \approx R_1 \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_V}\right). \quad (2.11)$$

Из выражения (2.11) следует, что R_1 будет тем ближе к R , чем меньше отношение R_1/R_V .

В схеме, представленной на рисунке 2.1,*б*, амперметр точно измеряет силу тока, проходящего через проволоку с сопротивлением R , но вольтметр измеряет суммарное падение напряжения на проволоке и на амперметре.

Тогда

$$U_{R2} = I_2 \cdot (R_A + R). \quad (2.12)$$

Подставим (2.12) в выражение (2.3):

$$R_2 = \frac{U_{R2}}{I_2} = R_A + R. \quad (2.13)$$

Откуда сопротивление проволоки R :

$$R = R_2 - R_A. \quad (2.14)$$

Полученное для R выражение (2.14) можно записать:

$$R = R_2 \cdot \left(1 - \frac{R_A}{R_2} \right). \quad (2.15)$$

Из выражения (2.15) следует, что R_2 будет тем ближе к R , чем меньше отношение R_A/R_2 .

Сравнивая выражения (2.11) и (2.15), приходим к выводу, что при малых R (т.е. при $R \ll R_V$, порядка долей и единиц Ом) следует пользоваться схемой измерения, представленной на рисунке 2.1,а, а при больших R (т.е. при $R \gg R_A$, порядка десятков и более Ом) – схемой, представленной на рисунке 2.1,б.

В настоящей лабораторной работе сопротивление проволоки не превышает единиц Ом, поэтому будем пользоваться схемой, представленной на рисунке 2.1,а. Поскольку $R \ll R_V$, слагаемым R_1/R_V в выражении (2.11) можно пренебречь, т.е. $R \approx R_1$.

Измерительная схема смонтирована на лабораторном макете, внешний вид которого представлен на рисунке 2.2.

Проволочные проводники закрепляются на передней торцевой панели макета с помощью специальных клемм. Для переключения между проводниками слева от них на макете расположен переключатель. Источник постоянного тока обеспечивает питание измерительной схемы. Ручка регулирования силы тока в цепи расположена на передней торцевой панели макета справа от проводников. При выполнении лабораторной работы в сопряжении с компьютером измеряемые напряжение и сила тока выводятся на экран монитора с помощью специального программного обеспечения. На вертикальной панели макета справа расположены амперметр и вольтметр, которые позволяют осуществлять измерения напряжения и силы тока без использования компьютера.



Рисунок 2.3 – Внешний вид макета:

- 1 – кнопка «Сеть»; 2 – панель выбора работы; 3 – переключатель проводников; 4 – клеммы для крепления проводников;
- 5 – проводники (проволоки); 6 – ручка регулирования тока;
- 7 – индикатор; 8 – амперметр; 9 – вольтметр

3 ЗАДАНИЕ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

3.1 Задание

Исследовать экспериментально зависимость падения напряжения на проводнике от силы тока, протекающего через него. Определить удельные сопротивления ρ_1 и ρ_2 двух проводников и рассчитать погрешности их определения.

3.2 Порядок выполнения работы

3.2.1 Закрепить два измеряемых проводника на **макете** с помощью клемм для крепления проводников. Каждый проводник закрепляется между клеммами с одинаковой нумерацией (слева и справа).

3.2.2 Запустить лабораторный **макет**. На **макете** на панели выбора работ выключить все тумблеры. Включить питание **макета**, нажав на кнопку «Сеть».

3.2.3 Запустить компьютер и дождаться загрузки Windows. Затем на «Рабочем столе» (на экране компьютера после загрузки Windows) щелкнуть дважды левой кнопкой мышки на ярлык папки «Лаборатория». В открывшемся окне выбрать из списка лабораторных работ «Измерение удельного электрического сопротивления металлов». Во вновь открывшемся окне появится **стенд (панель)** данной работы, на котором расположены вольтметр, амперметр, окно электронной таблицы и кнопки управления (рисунок 3.1).

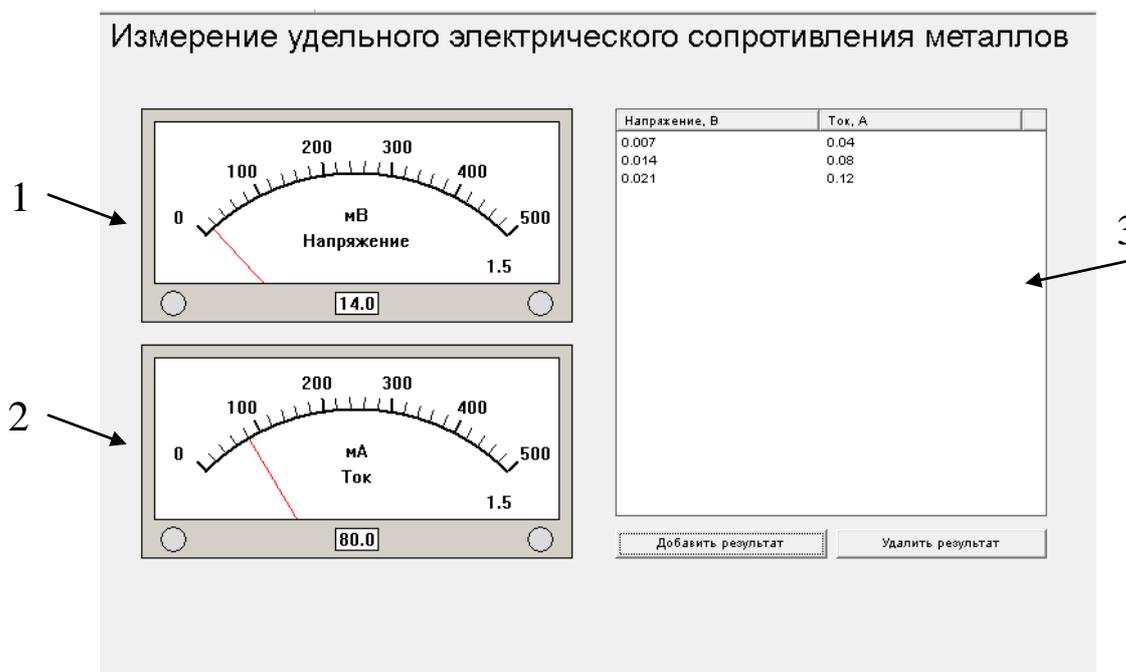


Рисунок 3.1 – Внешний вид окна лабораторной работы:
1 – вольтметр; 2 – амперметр; 3 – окно электронной таблицы

3.2.4 Выбрать на **макете** работу «Удельное сопротивление». Для этого нажмите на панели выбора работы первую кнопку слева. После этого на передней торцевой панели **макета** сверху слева от ручки регулирования тока должен загореться индикатор.

3.2.5 Переключателем проводников выбрать первый измеряемый проводник.

3.2.6 Вращая ручку регулирования тока против часовой стрелки, установить минимальное значение силы тока в цепи. Затем на **стенде** щелкнуть левой кнопкой мышки по кнопке «Добавить результат». После этого в окне электронной таблицы появятся значения напряжения и силы тока. В случае выполнении лабораторной работы без использования компьютера напряжение и сила тока измеряются с помощью вольтметра и амперметра, которые расположены справа на вертикальной панели **макета**.

3.2.7 Вращая ручку регулирования тока по часовой стрелке, увеличить силу тока на 20–40 мА (величину изменения силы тока выбрать такой, чтобы получилось 8–10 экспериментальных точек). Запишите показания вольтметра и амперметра, щелкнув левой кнопкой мышки по кнопке «Добавить результат». Аналогичным образом, последовательно увеличивая ток и записывая показания амперметра и вольтметра, получите 8–10 экспериментальных значений для силы тока и напряжения.

Примечание. В случае выполнения работы без использования компьютера экспериментальные данные заносятся сразу в рабочую тетрадь в таблицу 3.1.

3.2.8 Записать вручную значения измеренных величин из электронной таблицы в рабочую тетрадь в таблицу 3.1.

Примечание. Данные из окна электронной таблицы можно скопировать для дальнейшей обработки в программе Microsoft Excel либо её аналоге (ярлык программы на рабочем столе).

Таблица 3.1 – Результаты измерений

Номер измерения	1	2	3	...	8	9	10	Примечания
U_1 , мВ								
I_1 , мА								
U_2 , мВ								
I_2 , мА								
d_1 , мм								$\langle d_1 \rangle =$ мм
L_1 , мм								$\langle L_1 \rangle =$ мм
d_2 , мм								$\langle d_2 \rangle =$ мм
L_2 , мм								$\langle L_2 \rangle =$ мм
I_1 и U_1 – сила тока и напряжение для первого проводника; I_2 и U_2 – сила тока и напряжение для второго проводника; d_1 и L_1 – диаметр и длина первого проводника; d_2 и L_2 – диаметр и длина второго проводника								

3.2.9 Переключателем проводников выбрать второй измеряемый проводник. С помощью кнопки «Удалить результат» очистить окно электронной таблицы.

3.2.10 Провести измерения силы тока и напряжения, а также записать экспериментальные данные для второго проводника в соответствии с пунктами 3.2.6 – 3.2.8.

3.2.11 После записи экспериментальных данных в рабочую тетрадь, закрыть окно лабораторной работы, поставив указатель мышки на значок «Закрывать окно» в верхнем правом углу экрана и щелкнув левой кнопкой мышки. Вывести ручку регулирования тока в крайнее левое положение. На панели выбора работы выключить работу «Удельное сопротивление». Выключить питание макета, нажав кнопку «Сеть».

3.2.12 С помощью микрометра и линейки измерить 8–10 раз диаметр и длину каждого проводника, а результаты измерений занести в рабочую таблицу 3.1. Дальнейшую обработку экспериментальных результатов и построение графиков проводить в рабочей тетради.

Примечание: длина проводника измеряется между точками крепления проводника (т.е. между клеммами).

3.2.13 Построить на одном рисунке графики зависимости напряжения U от силы тока I для двух проводников по данным таблицы 3.1 (т.е. $U_1(I_1)$ и $U_2(I_2)$). Рассчитать погрешности для напряжений и сил тока. Нанести на график доверительные интервалы для U и I .

3.2.14 Если точки зависимости U от I укладываются на прямую в пределах их погрешностей (доверительных интервалов), то экспериментальная зависимость $U(I)$ соответствует теоретической (1.17). Тогда угловой коэффициент (коэффициент пропорциональности) зависимости $U(I)$ равен сопротивлению R . Если U зависит от I не линейно, то лабораторная работа выполнена некорректно.

3.2.15 Найти наиболее вероятные значения сопротивлений проводников R_1 и R_2 как угловых коэффициентов зависимостей $U_1(I_1)$ и $U_2(I_2)$ соответственно. Вычислить удельные сопротивления ρ_1 и ρ_2 двух проводников по выражению (2.1), используя средние значения геометрических размеров проводников.

3.2.16 Рассчитать погрешности определения удельных сопротивлений ρ_1 и ρ_2 проводников.

3.2.17 Для построения прямых линий и расчета угловых коэффициентов методом наименьших квадратов, а также расчета погрешностей можете воспользоваться программами, ярлыки которых расположены на рабочем столе.

3.2.18 После выполнения лабораторной работы выключить компьютер. Для этого щелкнуть левой кнопкой мышки по расположенной в левом нижнем углу экрана кнопке «Пуск». В открывшемся меню щелкнуть левой кнопкой мышки по строчке «Завершить работу», а затем по кнопке «ОК».

4 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

4.1 Что называется электрическим током? Дайте определения силы и плотности тока.

4.2 Что такое сторонние силы? Какова их природа?

4.3 Что такое электродвижущая сила (ЭДС)?

4.4 Дайте определение падения напряжения (или просто напряжения) на участке цепи.

Запишите выражение для падения напряжения для произвольного (неоднородного) участка цепи и для однородного участка цепи (т. е. без ЭДС).

4.5 Запишите закон Ома в дифференциальной и интегральной формах для однородного участка цепи.

4.6 Что такое удельное сопротивление ρ ? Единицы измерения ρ ?

4.7 Какова связь между удельным сопротивлением и удельной проводимостью?

4.8 От чего зависит электрическое сопротивление однородного проводника (проволоки)?

4.9 Почему проводник для измерения ρ берется в виде цилиндра?

4.10 Нарисуйте, не заглядывая в описание лабораторной работы, схему для измерения сопротивления, когда сопротивление образца $R \ll R_V$ (сопротивления вольтметра); схему, когда $R \gg R_A$ (сопротивления амперметра). Объясните, почему в каждом из этих случаев используется та или другая схема?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1 Савельев И. В. Курс общей физики: в 3 т. [Электронный ресурс]: учеб. / И. В. Савельев. – СПб. : Лань, 2018. – Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – 500 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/98246>, для авториз. пользователей (дата обращения: 13.06.2020.)

2 Бурачевский Ю. А. Электричество и магнетизм [Электронный ресурс]: учеб.-метод. пособие по аудиторным практическим занятиям и самостоятельной работе / Ю. А. Бурачевский. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2018. – 137 с. – Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/7729>, вход свободный (дата обращения: 13.06.2020.)

3 Чужков Ю. П. Общие требования и правила оформления отчета о лабораторной работе по физике : метод. указания / Ю. П. Чужков, А. А. Зенин. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2019. – 21 с.

4 Мухачев В. А. Оценка погрешностей измерений [Электронный ресурс]: метод. указания к лабораторной работе / В. А. Мухачев, А. Л. Магазинников. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012. – 24 с. – Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/1099>, вход свободный (дата обращения: 13.06.2020.)