

# Лабораторная работа №1

## Определение удельного сопротивления проводника

### 1. Введение.

*Электрическим током называют упорядоченное движение заряженных частиц.* Сами эти частицы называются *носителями тока*. В металлах и полупроводниках носителями тока являются электроны, в электролитах и ионизированных газах – положительные и отрицательные ионы.

Упорядоченное движение носителей тока приводит к переносу заряда в направлении их скорости. Интенсивность этого переноса характеризуется *плотностью тока*, численно равной величине заряда, переносимого в единицу времени через единицу площади поверхности, перпендикулярной направлению движения носителей тока. За направление тока принимается направление движения положительно заряженных частиц. В случае, когда все носители тока одинаковы, плотность тока определяется формулой

$$j = neu, \quad (1)$$

где  $n$  – концентрация носителей тока, т.е. число их в единице объема,  $e$  – заряд одной частицы,  $u$  – средняя скорость носителей тока. В случае, когда имеется несколько типов носителей тока, правая часть формулы (1) будет представлять собой сумму плотностей тока, создаваемого каждым типом частиц.

*Силой тока* через поверхность называется заряд проходящий через эту поверхность в единицу времени. Бесконечно малый элемент поверхности характеризуется вектором  $dS$ , направленным по нормали к поверхности, модуль которого равен площади этого элемента. Сила тока, протекающего через бесконечно малый элемент поверхности, равна

$$dI = j \cdot dS. \quad (2)$$

Сила тока, протекающего через конечную поверхность  $S$ , равна интегралу по этой поверхности от элементов силы тока:

$$I = \int_S j \cdot dS. \quad (3)$$

Одним из основных способов возбуждения электрического тока в проводниках является создание и поддержание в них электрического поля. Как показывает опыт, для многих проводников (в частности, металлов) в широких пределах плотность тока  $j$  пропорциональна напряженности электрического поля  $E$ . Это – один из важнейших, хотя и не фундаментальных, законов электродинамики. Он называется *законом Ома*. Математически закон Ома выражается формулой

$$j = \sigma \cdot E, \quad (4)$$

где коэффициент пропорциональности  $\sigma$  называется *удельной электрической проводимостью*. Строго говоря, формула (4) справедлива лишь для изотропных проводников, свойства которых одинаковы по всем направлениям. В анизотропных проводниках (кристаллах) направления векторов  $j$  и  $E$ , вообще говоря, не совпадают. Величина, обратная электрической проводимости, называется *удельным сопротивлением*:

$$\rho = \frac{1}{\sigma}. \quad (5)$$

Удельная электрическая проводимость зависит от свойств материала. По ее значению материалы делятся на три класса: диэлектрики, полупроводники и проводники. Резкой границы между ними нет. Диэлектрики – вещества с малой электрической проводимостью (большим удельным сопротивлением). Идеальный диэлектрик характеризуется отсутствием проводимости. Однако это может осуществиться лишь при 0 К. При температуре, отличной от 0 К, все материалы обладают определенной проводимостью и, следовательно, идеальных диэлектриков нет. Диэлектриком принято называть материал, удельное сопротивление которого  $\rho > 10^5$  Ом·м. Полупроводники имеют удельное сопротивление меньше  $10^5$  Ом·м, но больше  $10^{-3}$  Ом·м. Проводники характеризуются удельным сопротивлением, меньшим  $10^{-3}$  Ом·м. В основном – это металлы. Наиболее хорошими проводниками среди них являются медь и серебро, удельное сопротивление которых имеет порядок  $10^{-7}$  Ом·м.

В практически важном случае, когда электрические токи текут по тонким проводам, направление тока будет совпадать с направлением оси провода, а величина плотности тока может считаться одной и той же во всех точках его поперечного сечения. Сила тока через поперечное сечение провода площадью  $S$  равна

$$I = j \cdot S. \quad (6)$$

Если ток постоянен, то сила тока  $I$  будет одна и та же вдоль всего провода. Электрическое поле постоянного тока создается зарядами, находящимися на поверхности проводника, плотность которых не меняется со временем, хотя и происходит движение зарядов: на место ушедших зарядов приходит такое же количество новых зарядов. Поэтому, как и поле неподвижных зарядов, поле постоянного тока является потенциальным. Разность потенциалов между двумя точками провода численно равна работе электростатических сил по перемещению единичного положительного заряда на этом участке

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 E \cdot dl, \quad (7)$$

где  $dl$  – бесконечно малый элемент длины провода. С учетом формул (4) и (6) для разности потенциалов получаем

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 \frac{j \cdot dl}{\sigma} = I \cdot \int_1^2 \frac{dl}{\sigma \cdot S} = I \cdot R. \quad (8)$$

Здесь учтено, что в направлении тока  $j \cdot dl = j \cdot dl$ , т.е. ток течет от большего потенциала к меньшему. Величина

$$R = \int_1^2 \frac{dl}{\sigma \cdot S} \quad (9)$$

называется *электрическим сопротивлением* проводника. Для однородного провода постоянного поперечного сечения

$$R = \frac{l}{\sigma \cdot S} = \frac{\rho \cdot l}{S}, \quad (10)$$

где  $l$  – его длина. Разность потенциалов (8) называют также *напряжением* и обозначают  $U = \varphi_1 - \varphi_2$ . В случае, если участок цепи содержит источник сторонних (не электростатических) сил, напряжение

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}, \quad (11)$$

где  $\mathcal{E}$  – электродвижущая сила (ЭДС), равная работе сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда на этом участке. Формула

$$U = I \cdot R \quad (12)$$

выражает *закон Ома в интегральной форме* в отличие от формулы (4), представляющей этот закон в *локальной форме*. Формулу (12) называют также *законом Ома для участка цепи*.

Целью настоящей лабораторной работы является определение удельного сопротивления проводника. Наряду с этим экспериментально проверяется закон Ома (12) и пропорциональность сопротивления провода его длине. Согласно формуле (10) коэффициент пропорциональности  $k$  между  $R$  и  $l$  равен  $k = \frac{\rho}{S}$ . Зная площадь поперечного сечения провода и определив коэффициент  $k$ , можно найти удельное сопротивление как  $\rho = k \cdot S$ .

## 2. Экспериментальная установка.

Общий вид установки представлен на рис.1.

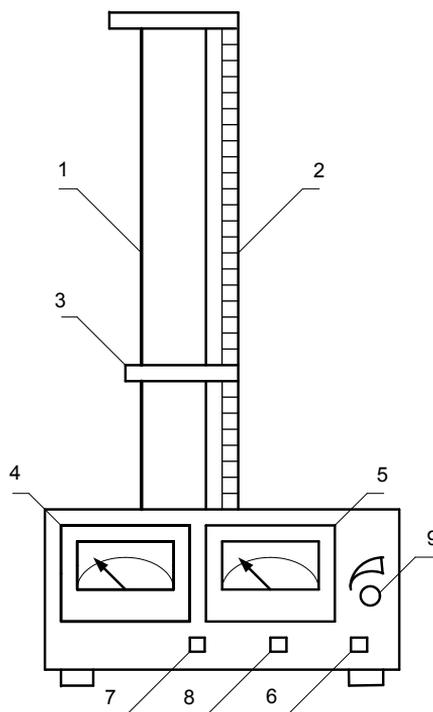


Рис.1.

Провод [1], удельное сопротивление которого требуется определить, натянут между неподвижными кронштейнами колонны [2], на которой нанесена метрическая шкала. Подвижный кронштейн [3] может передвигаться вдоль колонны и фиксироваться в любом положении. На подвижном кронштейне нанесена черта, которая позволяет определить по шкале колонны длину участка провода до нижнего кронштейна. Контактный зажим на подвижном кронштейне обеспечивает соединение данного участка провода с измерительной частью установки. Вольтметр [4] служит для измерения напряжения на выбранном участке провода, а амперметр [5] – для измерения силы тока в нем. Нажатие кнопки [6] вызывает включение напряжения питания. Нажатие кнопки [7] позволяет произвести измерения по одной из схем: при отжатой кнопке [8] с точным измерением силы тока, а при нажатой кнопке – с точным измерением напряжения. Ручка потенциометра [9] позволяет изменять силу тока в цепи.

### 3. Методика измерений.

Схема измерений с точным измерением силы тока представлена на рис.2.

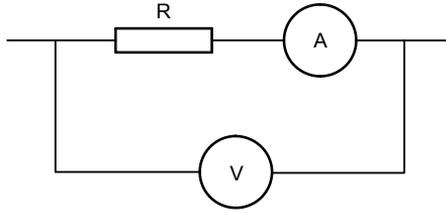


Рис.2.

$R$  – измеряемое сопротивление,  $A$  – амперметр,  $V$  – вольтметр.

В этом режиме измерений сила тока  $I$  в сопротивлении  $R$  совпадает с показаниями амперметра  $I_A$ :

$$I = I_A, \quad (13)$$

а напряжение  $U$  на сопротивлении  $R$  равно

$$U = U_V - I_A \cdot R_A, \quad (14)$$

где  $U_V$  – показания вольтметра,  $R_A = 0,15$  Ом – внутреннее сопротивление амперметра. В соответствии с законом Ома, измеряемое сопротивление определяется по формуле:

$$R = \frac{U_V}{I_A} - R_A. \quad (15)$$

Схема измерений с точным измерением напряжения приведена на рис.3.

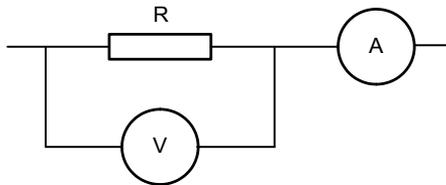


Рис.3

В этом режиме измерений напряжение  $U$  на сопротивлении  $R$  совпадает с показаниями вольтметра  $U_V$ :

$$U = U_V, \quad (16)$$

а сила тока  $I$  в сопротивлении  $R$  равна

$$I = I_A - \frac{U_V}{R_V}, \quad (17)$$

где  $I_A$  – показания амперметра,  $R_V = 2500$  Ом – внутреннее сопротивление вольтметра. Сопротивление  $R$  вычисляется по формуле:

$$R = \frac{U_V}{I_A - \frac{U_V}{R_V}} . \quad (18)$$

#### 4. Порядок выполнения работы.

1. Включить шнур питания прибора в розетку с напряжением 220 В и нажать кнопку [6] (см. рис.1).
2. Выбрать режим измерений с помощью кнопки [8] при нажатой кнопке [7].
3. Перемещая кронштейн [3], выбрать участок провода [1] и по шкале на колонне [2] определить его длину  $l$ .
4. Ручкой потенциометра [9] установить одно из значений силы тока  $I_A$  по шкале амперметра [5] и по шкале вольтметра [4] определить напряжение  $U_V$ .
5. Измерения напряжения  $U_V$  провести для пяти различных значений силы тока  $I_A$  в интервале от 100 до 250 мА и результаты записать в табл.1.

Табл.1

Режим	с точным измерением _____			
$l$ , мм				
$I_A$ , мА				
$U_V$ , В				
$I$ , мА				
$U$ , В				

6. Для одного из значений силы тока  $I_A$  провести измерения напряжения  $U_V$  для пяти различных значений длины  $l$  в интервале от 100 до 500 мм и результаты записать в табл.2.

Табл.2.

Режим	с точным измерением _____			
$I_A$ , мА				
$l$ , мм				
$U_V$ , В				
$I$ , мА				

$U, \text{В}$					
$R, \text{Ом}$					

### 5. Обработка результатов измерений.

1. По показаниям амперметра  $I_A$  и вольтметра  $U_V$  вычислить, согласно формулам (13) – (15) или (16) – (18), в соответствии с выбранным режимом измерений, силу тока  $I$ , напряжение  $U$ , сопротивление  $R$  и результаты записать в табл.1 и 2.
2. Построить по данным табл.1 вольтамперную характеристику, т.е. график зависимости  $U$  от  $I$ . Экспериментальным подтверждением закона Ома является линейная зависимость  $U$  от  $I$ .
3. Проверить пропорциональность сопротивления провода его длине, построив по данным табл.2 график зависимости  $R$  от  $l$ .
4. Вычислить угловой коэффициент  $k$  прямой  $R = k \cdot l$  и погрешность  $\delta_k$  по формулам:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n R_i \cdot l_i}{\sum_{i=1}^n l_i^2}, \quad (19)$$

$$\delta_k = \frac{1}{\sqrt{n-1}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n R_i^2}{\sum_{i=1}^n l_i^2} - k^2}. \quad (20)$$

5. Определить удельное сопротивление  $\rho$  и погрешность  $\delta_\rho$  как

$$\rho = k \cdot S, \quad (21)$$

$$\delta_\rho = \rho \cdot \sqrt{\left(\frac{\delta_k}{k}\right)^2 + \left(\frac{\delta_S}{S}\right)^2}, \quad (22)$$

где  $S = 0,102 \pm 0,003 \text{ мм}^2$  – площадь поперечного сечения провода. Сравните полученное значение со значением  $1,05 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$  для нихрома, из которого изготовлена проволока.

### 6. Контрольные вопросы.

1. Что называется электрическим током? Дайте определения силы и плотности тока.
2. Сформулируйте закон Ома в локальной и интегральной форме.

3. Дайте определения разности потенциалов, электродвижущей силе и напряжению.
4. От чего зависит электрическое сопротивление провода?