

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

$$\vec{j} = ne\vec{v}, \quad (1)$$

где n – концентрация носителей тока, т.е. число их в единице объема, e – заряд одной частицы, \vec{v} – 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 $d\vec{S}$, направленным по нормали к поверхности, модуль которого равен площади этого элемента. Сила тока, протекающего через бесконечно малый элемент поверхности, равна

$$dI = \vec{j} \cdot d\vec{S}. \quad (2)$$

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

$$I = \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S}. \quad (3)$$

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 \vec{j} пропорциональна напряженности электрического поля \vec{E} . Это – один из важнейших, хотя и не фундаментальных, законов электродинамики. Он называется *законом Ома*. Математически закон Ома выражается формулой

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

где коэффициент пропорциональности σ 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 \vec{j} и \vec{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

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 \vec{E} \cdot d\vec{l}, \quad (7)$$

где $d\vec{l}$ – бесконечно малый элемент длины провода. С учетом формул (4) и (6) для разности потенциалов получаем

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

Здесь учтено, что в направлении тока $\vec{j} \cdot d\vec{l} = j \cdot dl$, 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.

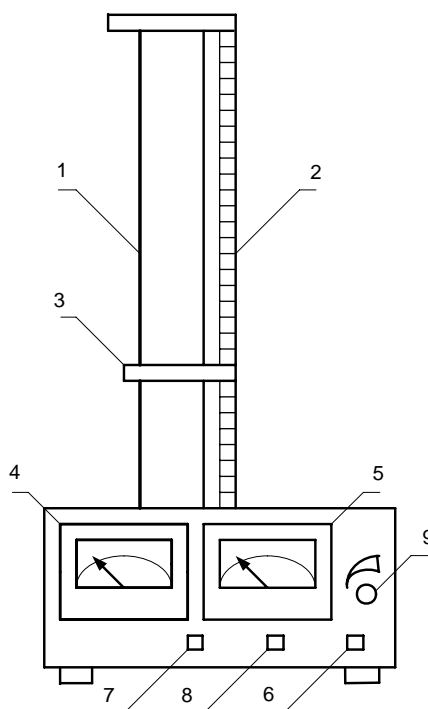


Рис.1.

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.

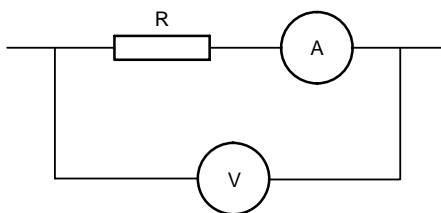


Рис.2.

R – измеряемое сопротивление, А – 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.

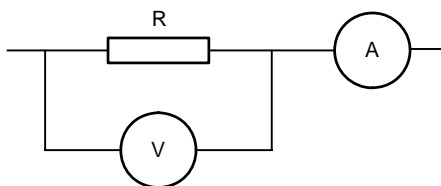


Рис.3

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			
$I_A, \text{мА}$				
$l, \text{мм}$				
$U_V, \text{В}$				
$I, \text{мА}$				
$U, \text{В}$				
$R, \text{Ом}$				

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 δ_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 ρ и погрешность δ_ρ 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?