

## **4. Лабораторная работа № 22**

### **ПРОВЕРКА СПРАВЕДЛИВОСТИ ЗАКОНА ОМА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКА**

#### **Цели работы:**

- 1) проверить справедливость закона Ома;
- 2) определить удельное сопротивление проводника.

#### **Приборы и принадлежности:**

- 1) лабораторная установка, включающая в себя штатив с измерительной линейкой, амперметр и вольтметр;
- 2) проводник из неизвестного материала.

#### **Подготовка к работе**

По лекциям и приведенному ниже списку литературы изучите следующие вопросы:

1. Электрический ток, сила и плотность тока.
2. Электродвижущая сила (ЭДС), условные обозначения элементов электрической цепи.
3. Разность потенциалов, напряжение.
4. Закон Ома для однородного участка цепи в интегральной и дифференциальной форме, сопротивление, удельное сопротивление, проводимость.

#### **Вопросы для допуска к работе**

1. Что называется электрическим током, силой и плотностью тока?

2. Дайте определение ЭДС. В каких единицах она измеряется? Почему для поддержания стационарного электрического тока необходимо наличие источника ЭДС?

3. Что называется разностью потенциалов, напряжением? В каких единицах они измеряются?

4. Запишите закон Ома для однородного участка цепи, закон Ома в дифференциальной форме.

### Теоретическое введение

Любое упорядоченное движение электрических зарядов называют *электрическим током*. В проводниках носители заряда перемещаются под действием приложенного электрического поля: положительные – по полю, отрицательные – против поля, то есть в проводниках возникает так называемый *ток проводимости*. Если упорядоченное движение электрических зарядов в пространстве происходит вместе с перемещением заряженных тел или частей тела, то возникают так называемые конвекционные токи.

Для возникновения и существования электрического тока необходимо наличие свободных носителей заряда (электронов, ионов и т. д.) и наличие электрического поля, которое бы приводило к направленному движению этих носителей. За направление тока условно принимают направление скорости движения положительных зарядов  $+q$ .

Количественной мерой электрического тока является *сила тока*  $I$  – скалярная физическая величина, равная заряду, протекающему через поперечное сечение проводника в единицу времени

$$I = \frac{dq}{dt}. \quad (4.1)$$

Если сила тока и его направление не изменяются с течением времени, то такой ток называют постоянным. Для постоянного тока

$$I = \frac{q}{t}, \quad (4.2)$$

где  $q$  – электрический заряд, протекающий через поперечное сечение проводника за время  $t$ .

Физическая величина, определяемая силой тока, протекающего через единицу площади поперечного сечения, перпендикулярного направлению тока, называется *плотностью тока*

$$j = \frac{dI}{dS_{\perp}}. \quad (4.3)$$

Направление вектора плотности тока  $\vec{j}$  связано с направлением вектора средней скорости  $\langle \vec{v} \rangle$  положительных зарядов:

$$\vec{j} = ne\langle \vec{v} \rangle, \quad (4.4)$$

где  $n$  – концентрация зарядов;  $e$  – элементарный заряд.

Сила тока через произвольную поверхность  $S$  определяется как поток вектора  $\vec{j}$ , то есть:

$$I = \int_S \vec{j} d\vec{S}. \quad (4.5)$$

Для поддержания тока в проводнике необходимо поддерживать разность потенциалов на концах проводника, для этого используют силы неэлектрической природы, их называют *сторонними силами*. Природа сторонних сил может быть различна: в гальванических элементах эти силы возникают за счет химической реакции между электродами и электролитами, в генераторах переменного тока – за счет механической энергии вращения ротора генератора. Под действием

создаваемого поля сторонних сил электрические заряды внутри источника тока движутся в сторону, противоположную направлению электростатического поля, создавая необходимую разность потенциалов на концах проводника, присоединенного к этому источнику.

Величина, численно равная отношению работы сторонних сил к величине перемещаемого в единицу времени заряда, называется *электродвижущей силой*

$$\varepsilon = \frac{A_{cm}}{q}. \quad (4.6)$$

*Напряжением*  $U$  на участке проводника называется физическая величина, определяемая работой, совершаемой суммарным полем электростатических и сторонних сил при перемещении единичного положительного заряда на данном участке проводника  $U = (\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon_{12}$ .

Понятие «напряжение» является обобщенным понятием разности потенциалов: напряжение на концах проводника равно разности потенциалов в том случае, если нет сторонних сил ( $\varepsilon_{12} = 0$ ).

Немецкий физик Георг Ом экспериментально установил, что сила тока  $I$ , текущего по однородному металлическому проводнику, пропорциональна напряжению  $U$  на концах проводника:

$$I = \frac{U}{R}, \quad (4.7)$$

где  $R$  – *электрическое сопротивление* проводника.

Уравнение (4.7) выражает закон Ома для однородного участка цепи.

Формально, сопротивление проводника  $R$  – это коэффициент пропорциональности между силой тока  $I$  в проводнике и напряжением  $U$  на его концах. С физической точки зрения, сопротивление про-

водника обусловлено взаимодействием движущихся носителей заряда с атомами кристаллической решетки металла.

Сопротивление проводников зависит от их размеров и формы, а также от материала, из которого проводник изготовлен. Для однородного линейного проводника длины  $l$  и площади поперечного сечения  $S$  сопротивление равно:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (4.8)$$

где  $\rho$  [Ом · м] – удельное сопротивление материала проводника.

Удельное сопротивление линейно зависит от температуры окружающей среды  $t$ :

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

где  $\rho_0$  – удельное сопротивление при температуре  $t = 0$  °С.

Закон Ома в дифференциальной форме может быть получен на основании вышеизложенного материала, а также теории электростатического поля, изложенной в лабораторной работе № 21, в следующем виде:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}, \quad (4.9)$$

где  $\sigma$  – удельная проводимость материала проводника;

$\vec{E}$  – напряженность электростатического поля, которая находится через градиент потенциала;

$$\begin{aligned} \vec{E} &= -\text{grad}(\varphi); \\ E &= \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{l_{12}}, \end{aligned} \quad (4.10)$$

где  $(\varphi_1 - \varphi_2)$  – разность потенциалов на концах проводника;

$l_{12}$  – длина проводника.

## Задание 1

### *Проверка влияния измерительных приборов на результаты измерений*

Измерительные приборы – вольтметр и амперметр – должны включаться так, чтобы включение их в электрическую цепь как можно меньше влияло на результаты измерений. По этой причине внутреннее сопротивление вольтметра выбирается большим, а амперметра – минимальным. На рис. 4.1 показаны два разных способа включения амперметра и вольтметра в электрическую цепь.

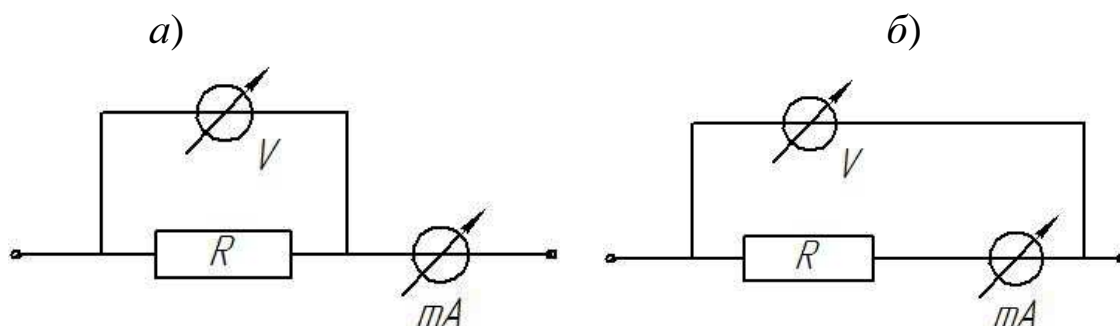


Рис. 4.1. Две схемы включения электроизмерительных приборов

Если переключатель находится в положении 1 (рис. 4.1, *a*), то миллиамперметр *mA* измеряет сумму токов, протекающих как по резистору *R*, так и по цепи вольтметра. Эти токи в случае, когда *R* соизмеримо по величине с внутренним сопротивлением вольтметра  $r_v$ , будут соизмеримы между собой, что приводит к большим ошибкам при измерении силы тока через резистор. Поэтому вольтметр *V* должен включаться по схеме (рис. 4.1, *б*), переключатель находится в положении 2.

Если же сопротивление *R* мало и соизмеримо с внутренним сопротивлением миллиамперметра  $r_{mA}$ , то и напряжения, падающие на резисторе *R* и на миллиамперметре, будут соизмеримы между собой. Следовательно, при включении по схеме (рис. 4.1, *б*) будут

большие ошибки при измерении напряжения на сопротивлении, и вольтметр нужно включать по схеме (рис. 4.1, а) в положение 1 переключателя.

Чтобы сделать выбор в пользу первой или второй схемы, необходимо провести измерения зависимости напряжения от тока при первом и втором положениях переключателя. Схема, при которой показания вольтметра дают наименьшую разницу значений  $U$ , должна быть выбрана основной.

## Задание 2

### *Проверка справедливости закона Ома для однородного участка цепи*

Г. Ом установил свой закон на основе экспериментальных данных. Цель задания 2 – повторить результаты Ома и экспериментально подтвердить справедливость формулы (4.7).

Если менять силу тока через проводник и откладывать по координатным осям соответствующие значения силы тока  $I$  ( $x$ ) и напряжения  $U$  ( $y$ ), то экспериментальные точки должны располагаться вдоль прямой. Из-за случайных погрешностей экспериментальные точки могут отклоняться от прямой, поэтому прямая линия проводится так, чтобы отклонения всех точек от нее в среднем были минимальны (рис. 4.2).

Значение сопротивления проводника  $R$  определяется следующим образом. На проведенной прямой произвольным образом выбираем две точки 1, 2. Их абсциссы равны  $I_1$  и  $I_2$ , а ординаты равны  $U_1$  и  $U_2$ , соответственно.

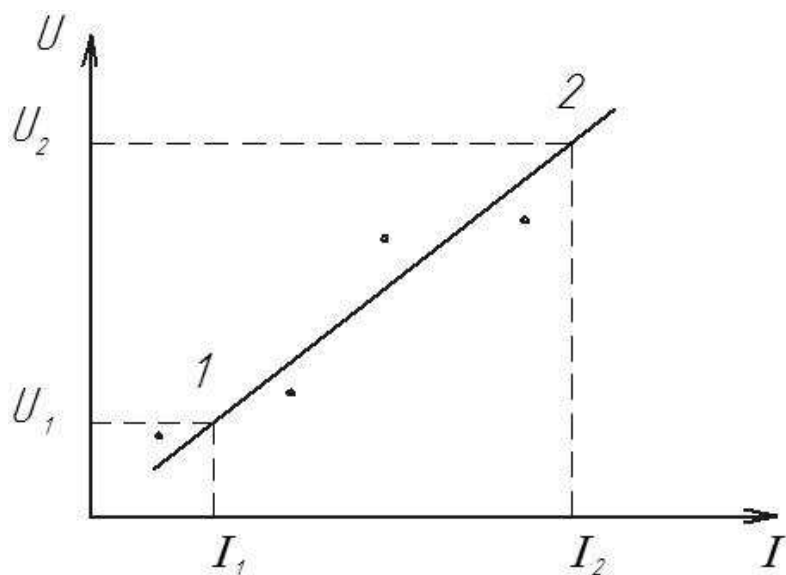


Рис 4.2. График зависимости напряжения на проводнике от силы тока

На основании формулы (4.7) имеем:

$$\begin{aligned} U_1 &= R \cdot I_1; \\ U_2 &= R \cdot I_2, \end{aligned} \quad (4.11)$$

Значение сопротивления  $R$  определяется разностным методом:

$$R = \frac{U_2 - U_1}{I_2 - I_1}. \quad (4.12)$$

При этом методе влияние случайных ошибок при измерениях напряжения и силы тока будут минимальны.

### Задание 3

#### **Определение удельного сопротивления проводника**

Как следует из формулы (4.8), сопротивление проводника линейно зависит от его длины  $R = f(l)$ . Поэтому для определения удельного сопротивления проводника  $\rho$  необходимо по методике второго за-



дания определить сопротивления проводника  $R_1$  и  $R_2$  при разных длинах  $l_1$  и  $l_2$ .

Удельное сопротивление определяется по следующей формуле:

$$\rho = \frac{R_2 - R_1}{l_2 - l_1} S. \quad (4.13)$$

В табл. 4.1 приведены значения удельных сопротивлений некоторых распространенных металлов и сплавов.

Таблица 4.1

Металл	$\rho$ , в мкОм·м, при $t = 20$ °С	Сплав	$\rho$ , в мкОм·м, при $t = 20$ °С
1. Медь	0,017	6. Хромель	0,66
2. Алюминий	0,027	7. Нихром	1,1
3. Железо	0,097	8. Хромаль	1,5
4. Свинец	0,2	9. Алюмель	3
5. Титан	0,55	10. Копель	4,6

### Порядок выполнения лабораторной работы

1. Составьте таблицу для записи результатов измерения напряжения  $U$  и тока  $I$  (табл. 4.2)

2. Определите площадь сечения провода по формуле:

$$S = \frac{\pi D^2}{4},$$

где  $D$  – диаметр провода, указанный на корпусе прибора.

3. С помощью ползунка на кронштейне установите длину провода  $l$ . Включите прибор в сеть. Изменяя силу тока, снимите зависимость  $U = U(I)$  (не менее четырех точек). Результаты занесите в табл. 4.2.

Таблица 4.2

№	$l$ (м)	$I$ (А)	$U$ (В)	$R$ (Ом)	$\rho$ (Ом·м)
1					
2					

4. Повторите измерения п. 3 для другого значения длины провода  $l$ .

5. Постройте графики зависимостей напряжения от силы тока для двух длин  $l_1$  и  $l_2$  и убедитесь в прямой пропорциональности значений  $U$  и  $I$ .

6. Определите удельное сопротивление  $\rho$  проводника по формуле (4.13) и по данным табл. 4.1 определите материал, из которого изготовлен проводник.

7. Взяв необходимые данные из табл. 4.2, проведите расчеты значений плотности тока, протекающего по проводнику, по формулам:

$$j = \frac{I}{S}; \quad j = \frac{U}{l\rho}$$

и сравните полученные результаты.

### Контрольные вопросы

1. По результатам выполнения задания № 1 обоснуйте, какая из измерительных схем дает меньшую погрешность.

2. Дайте определение силы тока. В каких единицах она измеряется?
3. Запишите закон Ома для однородного участка цепи.
4. Объясните роль источников ЭДС в электрических цепях.
5. Что такое сопротивление проводника? В каких единицах оно измеряется?
6. От каких физических величин зависит сопротивление проводника?
7. Как вычисляется сопротивление проводников при параллельном и последовательном соединении?
8. Запишите закон Ома в дифференциальной форме.

### **Список литературы**

1. Трофимова Т. И. Курс физики : учеб. пособие. – М. : Академия, 2015. – 560 с.
2. Тюшев А. Н., Вайсберг А. И. Курс лекций по физике : учеб. пособие. – 2-е изд., испр. и доп. Ч. 2. Электричество и магнетизм. – Новосибирск : СГГА, 2011. – 175 с.
3. Савельев И. В. Курс общей физики. В 3 т. Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика [Электронный ресурс] : учеб. пособие. – СПб. : Лань, 2016. – 500 с. – Режим доступа : [http://e.lanbook.com/books/element.php?p11\\_id=71761](http://e.lanbook.com/books/element.php?p11_id=71761).