



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра «Физика»

ПРАКТИКУМ

Лабораторная работа № Э 6
Определение удельного сопротивления
проводника методом вольтметра-
амперметра
по дисциплине

«ФИЗИКА»

Авторы
Жданова Т.П.,
Лемешко Г.Ф.,
Лещёва О.А.

Ростов-на-Дону, 2025

Аннотация

В практикуме кратко изложены теоретические вопросы, необходимые для успешного выполнения лабораторной работы, рабочее задание и контрольные вопросы. Предназначен для организации самостоятельной работы студентов всех специальностей, изучающих физику.

Авторы

к.ф.-м.н., доцент кафедры «Физика»
Жданова Т.П.

к.ф.-м.н., доцент кафедры «Физика»
Лемешко Г.Ф.

старший преподаватель кафедры «Физика»
Лещёва О.А.



Оглавление

Краткая теория.....	4
Описание установки и вывод рабочей формулы.....	10
Порядок выполнения работы.....	17
Контрольные вопросы.....	19
Список литературы.....	20

Лабораторная работа № Э 6

Определение удельного сопротивления проводника методом вольтметра-амперметра

Цель работы: Измерение удельного сопротивления проводника методом вольтметра-амперметра

Оборудование: Заводская установка

Краткая теория

Электрический ток – это направленное упорядоченное движение заряженных частиц. В металлах носителями тока являются электроны. За направление тока принимается направление движения положительных частиц.

Сила тока – скалярная физическая величина, определяемая зарядом, проходящим через поперечное сечение проводника в единицу времени:

$$I = \frac{dq}{dt}; \quad I = \frac{q}{t} \text{ (если } I = \text{const}).$$

Плотность тока – векторная физическая величина, численно равная отношению силы тока сквозь поверхность, перпендикулярную направлению тока, к площади этой поверхности

$$\vec{j} = \frac{I}{S}, \quad \vec{j} = ne\langle \vec{v} \rangle,$$

где S – площадь поперечного сечения проводника, $\langle \vec{v} \rangle$ – средняя скорость упорядоченного движения положительных зарядов в

проводнике, n – концентрация зарядов, e – элементарный заряд. Вектор плотности тока совпадает с направлением электрического тока.

Физическая сущность электрического сопротивления – противодействие, оказываемое материалом проводника движению электронов. Согласно классическим представлениям, электрическое сопротивление металлов обусловлено соударениями свободных электронов с ионами, расположенными в узлах кристаллической решетки металла.

Зависимость сопротивления от параметров проводника:

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где l – длина проводника, S – площадь поперечного сечения проводника, $\rho = \frac{1}{\gamma}$ – удельное сопротивление, γ – удельная проводимость.

Зависимость удельного сопротивления от температуры для металлических проводников:

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

где α – температурный коэффициент сопротивления, ρ_0 – удельное сопротивление при 0°C , t – температура проводника.

Сопротивление системы проводников: при последовательном (а) и параллельном (б) соединениях:

$$\text{а) } R = R_1 + R_2 + \dots + R_n,$$

$$б) \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n},$$

где $\frac{1}{R} = G$ – проводимость, n – число проводников.

Разность потенциалов численно равна работе электрических сил по перемещению единичного положительного заряда:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{эл}}{q}.$$

Электродвижущая сила численно равна работе сторонних (неэлектрических) сил по перемещению единичного положительного заряда:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{см}}{q}.$$

Напряжение численно равно суммарной работе сторонних и электрических сил по перемещению единичного положительного заряда:

$$U = \frac{A_{эл} \pm A_{см}}{q},$$

где знак «-» соответствует случаю, когда сторонние силы направлены против сил электрических.

Таким образом, напряжение: $U = \varphi_1 - \varphi_2 \pm \mathcal{E}$.

На **однородном** участке цепи отсутствуют сторонние силы, т.е. $\mathcal{E} = 0$, поэтому $U = \varphi_1 - \varphi_2$.

Участок цепи, где на носители действуют сторонние силы, называют **неоднородным**.

Закон Ома:

для однородного участка цепи:

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R} = \frac{U}{R},$$

для неоднородного участка цепи:

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{1,2}}{R},$$

для полной цепи:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r},$$

в дифференциальной форме (для однородного участка цепи):

$$\vec{j} = \gamma \vec{E},$$

где U – напряжение на однородном участке цепи, $(\varphi_1 - \varphi_2)$ – разность потенциалов на концах участка цепи, $\mathcal{E}$ – ЭДС источника тока, r – внутреннее сопротивление источника тока, $\vec{j}$ – плотность тока, γ – удельная проводимость, $\vec{E}$ – напряжённость электрического поля.

Сила тока короткого замыкания:

$$I_{\text{к.з.}} = \frac{\mathcal{E}}{r}.$$

Работа тока за время t :

$$A = I U t = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t.$$

Закон Джоуля-Ленца (количество теплоты, выделяемой при прохождении тока через проводник):

$$Q = I^2 R t .$$

Полезная мощность тока (выделяемая в нагрузке):

$$P_{\text{полезная}} = I^2 R = I U = \frac{U^2}{R} .$$

Полная мощность, выделяемая в цепи:

$$P_{\text{полная}} = I \cdot \mathcal{E} .$$

Мощность, теряемая в источнике:

$$P_{\text{потерь}} = I^2 r .$$

Коэффициент полезного действия источника тока:

$$\eta = \frac{P_{\text{полезная}}}{P_{\text{полная}}} = \frac{R}{R + r} .$$

Правила Кирхгофа:

- 1) Алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю:

$$\sum_i I_i = 0 \text{ или } \sum_j I_j = \sum_k I_k \text{ - для узлов,}$$

- 2) В любом замкнутом контуре, произвольно выбранном в разветвленной электрической цепи, алгебраическая сумма произведений сил токов I_i на сопротивления

R_i соответствующих участков этого контура равна алгебраической сумме ЭДС $\mathcal{E}_k$, встречающихся в этом контуре

$$\sum_i I_i R_i = \sum_k \mathcal{E}_k .$$

Применяя правила Кирхгофа, следует соблюдать следующие указания:

1. Перед составлением уравнений произвольно выбрать: а) направления токов и указать их стрелками на чертеже (хотя бы один ток должен входить в узел и хотя бы один выходить); б) направления обхода контуров (например, по часовой стрелке).

2. При составлении уравнений по *первому* правилу Кирхгофа считать токи, входящие в узел - положительными, а выходящие - отрицательными.

Число уравнений, составляемых по первому правилу Кирхгофа, должно быть на единицу меньше числа узлов, содержащихся в цепи.

3. При составлении уравнений по *второму* правилу Кирхгофа надо считать, что:

а) произведение силы тока на сопротивление участка контура $I_i R_i$ входит в уравнение со знаком "плюс", если направление тока в данном участке совпадает с выбранным направлением обхода контура, в противном случае произведение $I_i R_i$ входит в уравнение со знаком "минус",

б) ЭДС входит в уравнение со знаком “плюс”, если она повышает потенциал в направлении обхода контура, т.е. если при обходе приходится идти от минуса к плюсу внутри источника тока; в противном случае ЭДС входит в уравнение со знаком “минус”.

Число уравнений, составленных по второму правилу Кирхгофа, должно быть равно числу независимых контуров, имеющих в цепи.

Описание установки и вывод рабочей формулы

Общий вид рабочей установки представлен на рис. 1. Основными элементами ее являются: **1** – неподвижная колонка; **2** – миллиметровая шкала, закрепленная на колонке **1**; **3** – проволока, сопротивление которой измеряется в данной работе; она закреплена с помощью верхнего и нижнего неподвижных кронштейнов; **4** – кронштейн, который может перемещаться вдоль колонки **1**; **5** – винт, фиксирующий кронштейн **4** в любом положении.

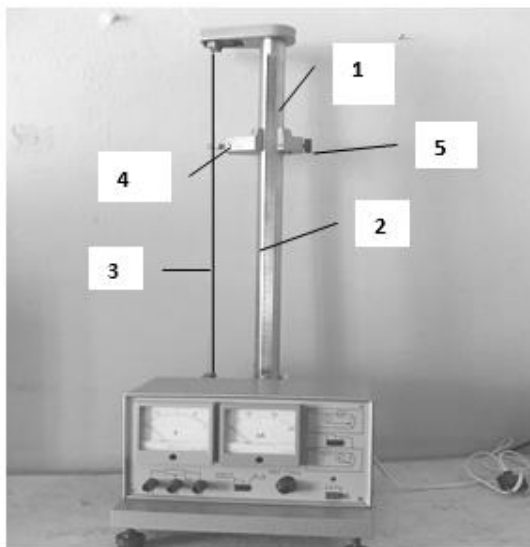


Рисунок 1 – Общий вид рабочей установки

На подвижном кронштейне **4** имеется указатель в виде черты, которая служит для фиксирования необходимой длины проводника. Нижний, верхний и средний (подвижный) контакты проволоки подключены при помощи проводов малого сопротивления к измерительной части прибора, изображенной на рисунке 2.

В измерительную часть входят миллиамперметр и вольтметр класса точности 1,5.

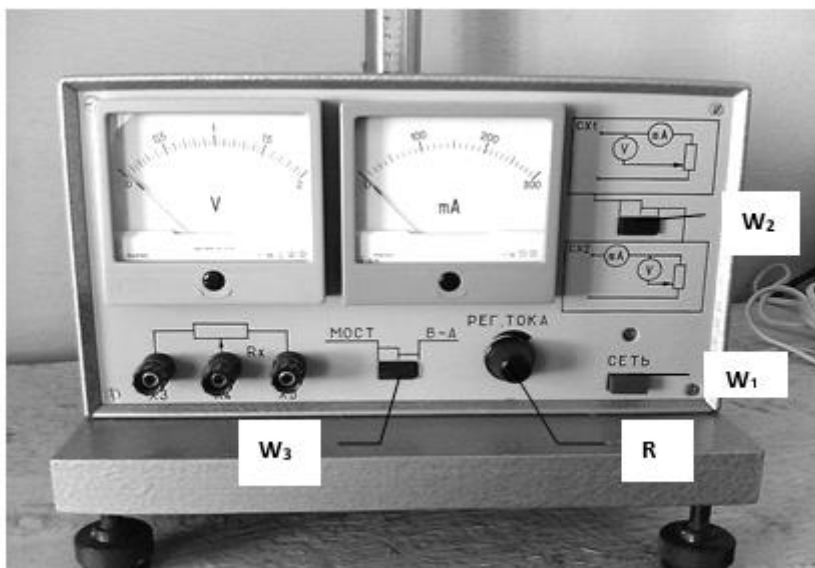


Рисунок 2 – Измерительной части прибора

Переключатель W_1 (рисунок 2) служит для включения прибора в сеть. При нажатии W_1 начинает светиться индикатор напряжения сети. Переключатель W_2 позволяет изменять схему подключения измерительных приборов. Если переключатель W_2 отжат, установка работает по методу точного измерения силы тока. Если же W_2 утоплен, установка работает по методу измерения напряжения. Переключатель W_3 устанавливает режим работы установки: при

нажатом W_3 включен режим «вольтметра–амперметра», при отжатом W_3 включен режим «моста».

В настоящей лабораторной работе переключатель W_3 должен быть постоянно нажат.

R – ручка регулятора тока.

Неизвестное сопротивление R_x может быть экспериментально определено из закона Ома для однородного участка цепи:

$$R_x = \frac{U_V}{I_A}. \quad (1)$$

Соответственно удельное сопротивление определяется по формуле:

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

где $S = \frac{\pi d^2}{4}$ - площадь поперечного сечения проволоки, d - диаметр проволоки.

По формуле (1) можно было бы получить достаточно точный результат при условии идеальности измерительных приборов – амперметра и вольтметра, а именно: сопротивление амперметра $R_A \rightarrow 0$; сопротивление вольтметра $R_V \rightarrow \infty$. Поскольку на практике R_A и R_V имеют определенные конечные значения, то результат определения сопротивления R_x , и, следовательно, удельного сопротивления ρ зависит от схемы подключения приборов.

Метод вольтметра-амперметра для измерения сопротивления может быть реализован в двух вариантах: метод измерения

напряжения и метод измерения тока. Рассмотрим особенности каждого из них.

1. Метод измерения напряжения

На рисунке 3 показана схема включения приборов для этого метода.

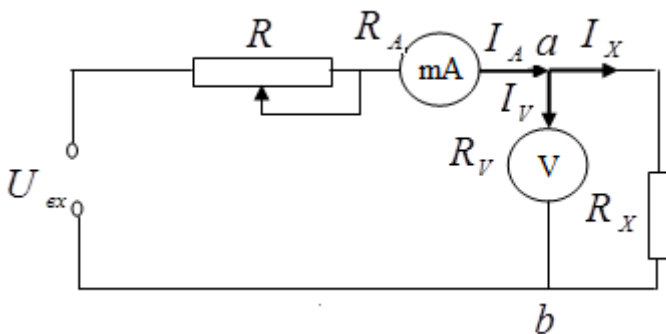


Рисунок 3 – Схема включения приборов для метода измерения напряжения: R_X – измеряемое неизвестное сопротивление исследуемого проводника, R – реостат для установки требуемого значения силы тока

При таком включении приборов амперметр показывает ток I_A , равный сумме токов I_X и I_V , текущих соответственно через сопротивление R_X и вольтметр. Тогда сопротивление R_{ab} , вычисленное по формуле (1), будет отличаться от R_X . Учитывая, что

$$I_A = I_X + I_V, \quad I_V = \frac{U}{R_V}, \quad I_X = \frac{U}{R_X}, \text{ получим:}$$

$$R_{ab} = \frac{U}{I_V + I_X} = \frac{U}{\frac{U}{R_V} + \frac{U}{R_X}} = \frac{R_X}{1 + \frac{R_X}{R_V}} \quad (3)$$

Относительная систематическая погрешность δR для этого варианта подключения амперметра и вольтметра определяется соотношением:

$$\delta R = \frac{|R_1 - R_X|}{R_X} = \frac{\frac{R_X}{R_V}}{1 + \frac{R_X}{R_V}}. \quad (4)$$

Отсюда видно, что при таком подключении измерительных приборов погрешность возникает из-за конечного сопротивления вольтметра R_V . При $R_V \rightarrow \infty$, $\delta R \rightarrow 0$. Для уменьшения погрешности важно, чтобы $R_X \ll R_V$, т.е. с помощью метода непосредственного измерения напряжения целесообразно измерять малые сопротивления.

Если R_V известно, то исключить систематическую погрешность можно, выразив R_X из равенства (3):

$$R_X = \frac{R_1}{1 - \frac{R_1}{R_V}}, \quad (5)$$

где $R_1 = \frac{U_V}{I_A}$.

В данной установке $R_V = 2000 \text{ Ом}$, а $R_1 < 5 \text{ Ом}$, таким образом, отношение R_1 / R_V имеет порядок 10^{-3} . В этом случае

путем математических преобразований можно получить приближение:

$$R_X \approx R_1 \left(1 + \frac{R_1}{R_V} \right). \quad (6)$$

Подставив (5) и (6) в выражение (2), получаем окончательно рабочую формулу для расчета удельного сопротивления проволоки:

$$\rho_l = \frac{\pi d^2}{4l} \cdot \frac{U_V}{I_A} \left(1 + \frac{U_V}{I_A R_V} \right), \quad (7)$$

где $R_V = 2000 \text{ Ом}$ - сопротивление вольтметра, $d = 0,365 \text{ мм}$ - диаметр проволоки.

2. Метод измерения тока

Принципиальная схема включения измерительных приборов для этого метода представлена на рисунке 4.

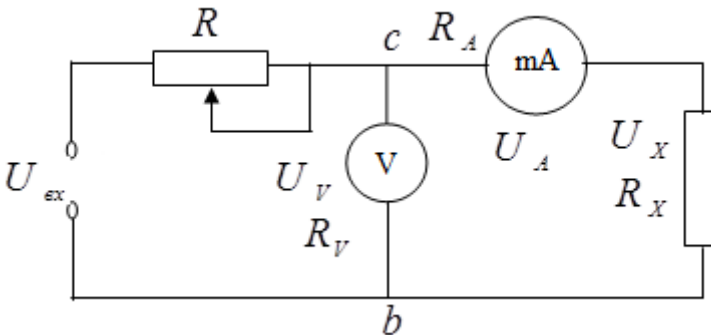


Рисунок 4 – Схема включения приборов для метода измерения

тока: R_X - измеряемое неизвестное сопротивление,

R – реостат для регулировки тока

При вычислении сопротивления из непосредственного измерения тока по формуле:

$$R_{bc} = \frac{U_V}{I_A}, \quad (8)$$

возникает систематическая погрешность из-за того, что вольтметр показывает сумму падений напряжения на сопротивлениях R_X и R_A , т.е.:

$$U_V = U_X + U_A.$$

В этом случае:

$$R_{bc} = \frac{U_V}{I_A} = \frac{U_X + U_A}{I_A} = \frac{U_X}{I_A} + \frac{U_A}{I_A} = R_X + R_A. \quad (9)$$

Относительная систематическая погрешность для этого варианта подключения амперметра и вольтметра определяется соотношением:

$$\delta R = \frac{|R_2 - R_X|}{R_X} = \frac{R_A}{R_X}, \quad (10)$$

откуда следует, что данный метод лучше использовать в случае, когда измеряемое сопротивление много больше сопротивления амперметра, т.е. $R_X \gg R_A$. Если сопротивление R_A известно, то исключить систематическую погрешность можно, выразив R_X из равенства (9):

$$R_X = R_2 - R_A. \quad (11)$$

Подставляя (8) и (11) в выражение (2), получаем рабочую формулу для расчета удельного сопротивления:

$$\rho_2 = \frac{\pi d^2}{4l} \cdot \left(\frac{U_V}{I_A} - R_A \right), \quad (12)$$

где $R_A = 0,3$ Ом - сопротивление миллиамперметра, $d = 0,365$ мм - диаметр проволоки.

Порядок выполнения работы

1. Перемещая кронштейн 4 (рисунок 1) вдоль колонки 1, установить по шкале 2 первое заданное значение l длины проволоки 3, зафиксировав положение кронштейна винтом 5.

2. Нажать переключатель W_2 , что соответствует методу точного измерения напряжения (рисунок 2). С помощью регулятора R установить первое заданное значение силы тока, снять соответствующее показание вольтметра. Записать в таблицу.

3. Отжать переключатель W_2 (что соответствует методу точного измерения силы тока). Записать показание вольтметра.

(Поскольку $R_A \ll R_V$, показания миллиамперметра при нажатом и отжатом положениях переключателя W_2 практически не отличаются.)

4. Повторить измерения по п.п. 2 – 3 для других значений тока.

5. Повторить действия по п.п. 1 – 4 для других значений длины проволоки.

6. Рассчитать по формуле (7) ρ_1 для всех значений l и I_A , занести в таблицу 1.

7. Рассчитать по формуле (12) ρ_2 для всех значений l и I_A , занести в таблицу 1.

8. Найти средние значения:

$$\langle \rho_1 \rangle = \frac{\sum_{i=1}^9 \rho_{1i}}{9} \text{ и } \langle \rho_2 \rangle = \frac{\sum_{i=1}^9 \rho_{2i}}{9}.$$

9. Рассчитать абсолютные погрешности $\Delta \rho_1$ и $\Delta \rho_2$ каждого измерения по формулам: $\Delta \rho_{1i} = |\langle \rho_1 \rangle - \rho_{1i}|$ и $\Delta \rho_{2i} = |\langle \rho_2 \rangle - \rho_{2i}|$, занести в таблицу.

10. Рассчитать среднее значение $\langle \rho \rangle$ по формуле:

$$\langle \rho \rangle = \frac{\langle \rho_1 \rangle + \langle \rho_2 \rangle}{2}.$$

11. Рассчитать среднюю абсолютную $\langle \Delta \rho \rangle$ и относительную $\delta \rho$ погрешности по формулам:

$$\langle \Delta \rho \rangle = \frac{\langle \Delta \rho_1 \rangle + \langle \Delta \rho_2 \rangle}{2}, \quad \delta \rho = \frac{\langle \Delta \rho \rangle}{\langle \rho \rangle}.$$

12. Окончательный результат представить в виде:

$$\rho = \langle \rho \rangle \pm \langle \Delta \rho \rangle.$$

Таблица 1

$I, \text{ м}$	№ пп	$I_A, \text{ мА}$	$U_V, \text{ В}$		$\rho_1,$	$\Delta \rho_1,$	$\rho_2,$	$\Delta \rho_2,$
			W_2 вкл.	W_2 выкл.	$\text{Ом} \cdot \text{м}$	$\text{Ом} \cdot \text{м}$	$\text{Ом} \cdot \text{м}$	$\text{Ом} \cdot \text{м}$
0,2	1	50						
	2	150						
	3	250						
0,25	1	50						
	2	150						
	3	250						
0,3	1	50						
	2	150						
	3	250						
Средние значения								
$\langle \rho \rangle =$			$\langle \Delta \rho \rangle =$		$\delta \rho =$			

Контрольные вопросы

1. Описать ход работы, объясняя смысл всех операций. Знать все обозначения, используемые в таблицах.
2. Дать определение электрического тока.
3. Что называется силой тока?
4. Что называется плотностью тока?
5. Какой проводник называется однородным?

6. Записать закон Ома для однородного участка цепи, для неоднородного участка цепи, для полной цепи, в дифференциальной форме. Что такое сторонние силы?
7. Что такое разность потенциалов, электродвижущая сила, напряжение?
8. Сопротивление при последовательном и параллельном соединениях проводников.
9. Зависимость сопротивления от параметров проводника.
10. Зависимость сопротивления от температуры проводника.
11. Сила тока короткого замыкания.
12. Работа и мощность тока.
13. Закон Джоуля-Ленца.
14. Каков физический смысл удельного сопротивления материала?
15. В каких случаях при измерениях сопротивлений необходимо применять метод непосредственного измерения напряжений, а в каких – непосредственного измерения тока?

Список литературы

1. Благин А.В. Физика для инженеров / А.В. Благин, Т.С. Беликова, Т.П. Жданова и др. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2022. – 601с.
2. Грабовский Р.И. Курс физики: учебное пособие для вузов / Р.И. Грабовский – Санкт-Петербург: Лань, 2024. – 609с.
3. Трофимова, Т. И., Физика. В таблицах и формулах: учебное пособие / Т. И. Трофимова. — Москва : КноРус, 2023. — 447 с.

Инструкция по технике безопасности при выполнении лабораторной работы

1. При работе с электрическими схемами соблюдать правила безопасности, избегать коротких замыканий и перегрузок.
2. Категорически запрещается касаться руками или другими предметами зажимов цепи, находящихся под напряжением.
3. По окончании работы обязательно отключить электрическую схему от источника напряжения.