

**ПЕРВОЕ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ РОССИИ**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**Кафедра Общей и технической физики**

## **ФИЗИКА**

# **ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ ПРИ ПОМОЩИ МОСТА УИТСТОНА**

*Методические указания к лабораторной работе  
для студентов всех специальностей  
и направлений подготовки бакалавриата*

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2020**

УДК 531/534 (075.83)

**ФИЗИКА. Измерение сопротивлений при помощи моста Уитстона:** Методические указания к лабораторной работе для студентов всех специальностей и направлений подготовки бакалавриата. Сост.: С.С. Прошкин, В.В. Фицак, М.О. Силиванов. «Санкт-Петербургский горный университет». СПб, 2020, 23 с.

Методические указания к лабораторной работе дают возможность ознакомиться с физическими явлениями, методикой выполнения лабораторного исследования и правилами оформления лабораторных работ. Выполнение лабораторной работы позволит студенту сформировать необходимые компетенции.

Методические указания предназначены для студентов всех специальностей и направлений подготовки бакалавриата.

Табл. 3. Ил. 8. Библиогр. 6 назв.

Научный редактор проф. А.С. Мустафаев

**Цель работы:** 1. Изучение принципа работы измерительной мостовой схемы Уитстона. 2. Определение сопротивления проволочных проводников. 3. Определение удельного сопротивления материала.

## 1. Введение

В 1792-1794 гг. итальянский ученый Alessandro Volta впервые поместил пластины из цинка и меди в кислоту и получил электрический ток, создав первый в мире химический источник тока («Вольтов столб», 1800 год). Именно данный источник постоянного тока стал прародителем современных электрических батарей.

В 1826 г. немецкий физик Georg Simon Ohm в своей работе «Определение закона, в соответствии с которым металлы проводят электричество» сформулировал свой знаменитый закон, связывающий силу тока и разность потенциалов на концах проводника. В 1827 г. в книге: «Математический расчет гальванической цепи» он привел теоретическое доказательство своего закона, исходя из теории, аналогичной теории теплопроводности Фурье. Несмотря на важность работ Ома, они были неприняты научным сообществом. Только после того, как в 1831-1837 гг. французский физик Клод Пустье, не зная о трудах Ома, опытным путем подтвердил его закон, ученый мир признал приоритет Георга Ома.

30 ноября 1841 года Лондонское королевское общество на своем заседании присудило Ому свою высшую награду - медаль Коупли.

Закон Ома впервые в истории науки дал возможность количественно рассмотреть законы электрического тока. Все последующие как теоретические, так и опытные проверки закона Ома доказали его абсолютную точность.

В 1841 г. английский ученый Джеймс Джоуль открыл закон, устанавливающий квадратичную зависимость между силой тока и количеством теплоты, выделяющимся этим током в проводнике (в русской литературе этот закон назван именем Джоуля-Ленца, так как 1842 г независимо этот закон был открыт российским физиком Эмилием Ленцем).

На открытие данного важнейшего закона в то время никто не обратил внимание, включая Лондонское королевское общество. За публикацию результатов работы Джоуля взялся лишь журнал Манчестерского литературного и философского общества.

Только в конце 1840-х гг. труды Джоуля были оценены по достоинству, и в 1850 г. он был избран членом Лондонского королевского общества, а в 1852 г. его наградили Королевской медалью.

В 1845 г. выдающийся немецкий физик Густав Кирхгоф сформулировал Правила Кирхгофа, представляющие собой соотношения, которые связывают между собой токи и напряжения в любой замкнутой цепи. Решения систем линейных уравнений, составленных на основе правил Кирхгофа, позволяют найти все токи и напряжения в электрических цепях постоянного, переменного и квазистационарного тока.

## **2. Методы измерения электрического сопротивления**

Таким образом, к середине XIX века в физике были получены все основные законы, позволяющие проводить численные расчеты любых электрических цепей.

Однако, применение всех перечисленных законов на практике априори предполагает точное знание электрических сопротивлений различных участков цепи, включая сопротивление соединительных проводов и внутренних сопротивлений источников питания и измерительных приборов.

Данное обстоятельство привело к необходимости разработки экспериментальных методов измерения сопротивлений, включая очень малые значения этих сопротивлений.

На сегодняшний день для измерения электрического сопротивления применяются следующие методы:

1. Определение сопротивления путем прямого измерения тока и падения напряжения на сопротивлении (резисторе) (метод амперметра-вольтметра). Величину сопротивления находят из закона Ома для участка цепи путем деления напряжения  $U$  на величину тока  $I$ :

$$R = \frac{U}{I}.$$

2. Определение сопротивления по результатам измерения тока в резисторе при фиксированном напряжении на участке цепи (метод омметра). В этом случае шкала амперметра градуируется в Омах.

3. Метод прямого или косвенного сравнения измеряемого сопротивления с образцовым (эталонным) сопротивлением. В этом методе не требуется измерять токи и напряжения, что дает возможность получения очень точных результатов. Разновидностью такого метода сравнения является одинарный мост постоянного тока. Метод сравнения позволяет измерять не только значения электрических сопротивлений, но и находить значения емкостей, индуктивностей и других электрических величин.

Поскольку точность измерения мостовых схем может достигать 0,01%, мостовые схемы получили широкое распространение, как в лабораторной, так и производственной практике.

### **3. Одинарный мост постоянного тока (Мост Уитстона)**

Одинарный измерительный мост постоянного тока впервые был предложен в 1833 г. Самуэлем Хантером, а в 1843 г. был кардинально усовершенствован английским ученым Чарльзом Уитстоном<sup>1</sup>.

Этот способ измерения отличает более высокая точность, т. к. он основан на сравнении измеряемой величины с ее эталоном или образцовой мерой. Поэтому он может быть применен для поверки и градуировки электроизмерительных приборов. Например, на основе моста Уитстона работают различные самопишущие и показывающие приборы в химической, пищевой и других отраслях промышленности, где, например, требуется измерение и регистрация

---

<sup>1</sup> Уитстон в 1829 г. запатентовал музыкальный инструмент концертину, а в 1837 г. в соавторстве с Уильямом Куком получил патент на электромагнитный телеграф и создал первую действующую телеграфную линию в Англии.

температуры с высокой точностью. В этом случае в одно из плеч моста подключается термодатчик (термопара).

В горной промышленности и строительстве в мост Уитстона включают тензорезистор (тензодатчик), измеряющий изменение давления или деформацию (изгиб или сжатие-растяжение) в конструктивных элементах зданий, сооружений, в сводах подземных выработок и т.д. Чувствительность моста и тензодатчиков позволяет измерять даже микродислокации (микродавления) в исследуемом объекте.

Основной частью электрической цепи моста Уитстона является четырехполюсник, т. е. участок цепи, имеющий четыре узла (полюса) –  $A, B, C, D$  (рис. 1).

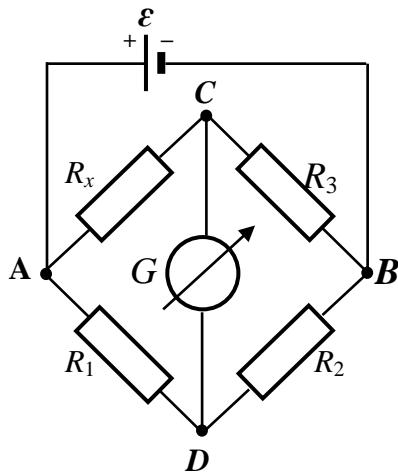


Рис. 1. Электрическая схема моста Уитстона

Измеряемое сопротивление  $R_x$  и три других сопротивления образуют замкнутый четырехугольник. В одну диагональ четырехугольника включен гальванометр  $G$  (этот участок и является мостиком), а в другую диагональ включен источник постоянного тока с ЭДС, равной  $\epsilon$ .

Гальванометром называется электроизмерительный прибор, имеющий высокую чувствительность к току или напряжению. В

нашей схеме включен гальванометр магнитоэлектрической системы с нулем посередине шкалы. Это обстоятельство позволяет фиксировать токи противоположных направлений. Таким образом, гальванометр используется в качестве нулевого прибора, показывающего отсутствие тока в ветви  $CD$  моста.

При произвольных значениях всех сопротивлений гальванометр покажет наличие тока на участке  $CD$ . Но можно подобрать сопротивления  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  так, что ток в цепи гальванометра будет равен нулю.

На практике очень часто используют схему так называемого линейного или реохордового моста Уитстона (рис. 2). Сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  в этой схеме лежат на одной прямой и вместе представляют собой однородную проволоку (реохорд), по которой на скользящем контакте перемещается движок  $D$ , соединенный с гальванометром  $G$ . Реохорд представляет собой однородный провод, закрепленный на панели с измерительной линейкой.

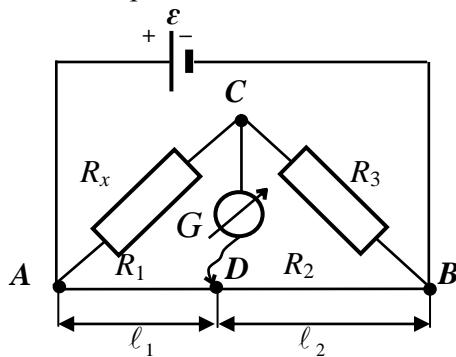


Рис. 2. Принципиальная схема моста Уитстона с реохордом

Вследствие того, что проволока реохорда однородна и везде имеет одинаковое поперечное сечение, отношение сопротивлений участков цепи  $AD$  (сопротивление  $R_1$ ) и  $DB$  (сопротивление  $R_2$ ) можно заменить отношением соответствующих длин плеч реохорда  $l_1$  и  $l_2$ . Поскольку сопротивление проволоки прямо пропорционально ее

длине  $R = \rho \frac{l}{S}$ , отношение сопротивлений плеч реохорда можно записать в виде:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{l_1}{l_2}.$$

Можно показать, что окончательная формула для определения искомого сопротивления  $R_x$  имеет вид:

$$R_x = R_3 \frac{l_1}{l_2}. \quad (1)$$

Таким образом, если вместо  $R_3$  в схеме на рис. 2 включить сопротивление известного номинала и точно измерить по линейке расстояния  $l_1$  и  $l_2$ , отвечающие условию  $I_G = 0$ , можно определить неизвестное сопротивление  $R_x$ , включенное в схему моста. Известно, что реохордный мост Уитстона обладает наибольшей чувствительностью, когда движок расположен в середине реохорда. Точное определение  $R_x$  позволяет найти значение удельного сопротивление проводника, в том числе неизвестного сплава, по формуле:

$$\rho = R_x \frac{S}{l}. \quad (2)$$

#### 4. Расчет моста Уитстона с помощью правил Кирхгофа

Рассмотрим применение правил Кирхгофа для расчета условия равновесия одинарного моста Уитстона (рис. 3).

Для этого проделаем следующее:

1. обозначим токи в ветвях моста произвольным образом с соответствующими обозначениями.
2. выберем направление обхода контуров, например, по часовой стрелке.

В представленной на рис. 3 электрической цепи имеются четыре узла и четыре независимых контура, поэтому запишем не более трех уравнений Кирхгофа для узлов и не более трех уравнений для контуров:

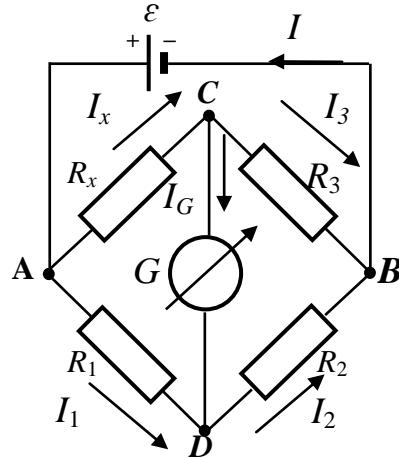


Рис. 3. Применение правил Кирхгофа к расчету моста Уитстона

$$\begin{cases} I - I_x - I_1 = 0; \text{ (узел } A) \\ I_x - I_3 - I_G = 0; \text{ (узел } C) \\ I_1 + I_G - I_2 = 0; \text{ (узел } D) \\ I_x R_x + I_G R_G - I_1 R_1 = 0; \text{ (контур } ACDA) \\ I_3 R_3 - I_2 R_2 - I_G R_G = 0; \text{ (контур } CBDC) \\ I_1 R_1 + I_2 R_2 = \varepsilon. \text{ (контур } ADBA) \end{cases} \quad (3)$$

Решая систему уравнений (3) и избавляясь от токов  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_x$ ,  $I$ , найдем выражение для тока, текущего через гальванометр  $I_G$ :

$$I_G = \frac{(R_x R_2 - R_1 R_3) \varepsilon}{R_G (R_x + R_3) (R_1 + R_2) + R_x R_3 (R_1 + R_2) + R_1 R_2 (R_x + R_3)}. \quad (4)$$

Мост Уитстона, в котором поиск  $R_x$  осуществляется по измерению тока  $I_G$ , называется неуравновешенным (несбалансированным). При этом точное нахождение  $R_x$  возможно только при соблю-

дении строго постоянства напряжения питания  $\varepsilon$ . Это обстоятельство определяет главный недостаток несбалансированных мостов. При этом методе на точность измерений сопротивлений влияет инструментальная погрешность гальванометра, что ограничивает возможности использования несбалансированных мостов для нахождения неизвестных сопротивлений. Поэтому подобные мосты чаще находят применение для измерения неэлектрических величин (температуры, давления, светового потока и т.п.).

Из формулы (4) следует, что при определенных значениях  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  можно добиться отсутствия тока через гальванометр ( $I_G=0$ ), тогда из системы уравнений (3) получим:

$$\begin{cases} I_x = I_3; \\ I_1 = I_2; \\ I_x R_x = I_1 R_1; \\ I_3 R_3 = I_2 R_2. \end{cases} \quad (5)$$

Решая данную систему (5) придем к уравнению, аналогичному (1):

$$R_x R_2 = R_1 R_3. \quad (6)$$

Точно такое же уравнение получится из (4), если в нем ток гальванометра приравнять нулю.

Таким образом, в случае уравновешенного моста нет необходимости стабилизировать напряжение источника питания и измерять ток, текущий через гальванометр.

Точность измерения  $R_x$  в этом случае зависит исключительно от точности и стабильности значений сопротивлений резисторов  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$ . Важно отметить, что при увеличении напряжения источника  $\varepsilon$  чувствительность мостовой схемы возрастает, однако при этом приходится учитывать увеличение токов в резисторах и соединительных проводах. В результате нагрева указанные сопротивления могут значительно возрастать. По этой причине при проведении измерений источник тока должен подключаться к реохорду лишь на короткое время для того, чтобы струна реохорда, соединительные провода и сопротивления не испытывали значительного нагрева.

По выше перечисленным причинам, изображенный на рис. 3 мост обычно применяется для измерения сопротивлений  $R_x > 1$  Ом, в противном случае, сопротивления проводов и контактов становятся соизмеримыми с  $R_x$ .

Как следует из равенства (6), для точного измерения  $R_x$  в широких пределах, должна быть предусмотрена возможность легко изменять величины сопротивлений  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$ . В одинарных мостах это осуществляется различными способами, которые определяют разновидности мостов Уитстона: реостатные, магазинные, реохордные.

В нашей лабораторной работе используется магазинно-реохордный мост Уитстона. Сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  являются сопротивлениями плеч реохорда, а  $R_3$  – сопротивление магазина.

Найдем, в каком положении движка реохорда погрешность измерений нашей установки будет наименьшей. При этом учтем, что согласно формуле (1)  $R_1 \sim l_1$ ,  $R_2 \sim l_2 = l - l_1$ , тогда формула (6) примет вид:

$$R_x = R_3 \frac{l_1}{l - l_1}, \quad (7)$$

где  $l$  - полная длина реохорда.

Относительная погрешность измерения  $R_x$  согласно косвенным измерениям по формуле (7) равна:

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta l_1}{l_1} + \frac{\Delta l}{l - l_1} + \frac{\Delta l_1}{l - l_1}. \quad (8)$$

Величина  $\frac{\Delta R_3}{R_3}$  определена классом точности магазина сопротивлений.

Тогда найдем условие, при котором достигается минимум погрешности по формуле (8). Для этого найдем условие достижения экстремума функции (8), т. е. приравняем нулю производную по переменной  $l_1$ :

$$\begin{aligned} \left( \frac{\Delta R_x}{R_x} \right)'_{l_1} &= -\frac{\Delta l_1}{l_1^2} + \frac{\Delta l}{(l-l_1)^2} + \frac{\Delta l_1}{(l-l_1)^2} = \frac{-\Delta l_1(l-l_1)^2 + \Delta l l_1^2 + \Delta l_1 l_1^2}{l_1^2(l-l_1)^2} = \\ &= \frac{\Delta l_1(l_1^2 + 2l \cdot l_1 - l^2)}{l_1^2(l-l_1)^2} = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Поскольку  $\Delta l_1 = \Delta l \neq 0$  из (9) получим квадратное уравнение:

$$l_1^2 + 2l \cdot l_1 - l^2 = 0,$$

решением, которого будут два корня:

$$l_1 = \frac{-2l \pm 2l\sqrt{2}}{2} = -l \pm l\sqrt{2}.$$

Легко заметить, что физический смысл будет иметь только значение корня  $l_1 = -l + l\sqrt{2} = l(\sqrt{2} - 1) \approx 0,414l$ .

Таким образом, погрешность измерений используемой мостовой схемы будет минимальной при положении контакта движка реохорда (точка  $D$ ) примерно посередине шкалы. Важно заметить, что при изменении длины плеча  $l_1$  от  $0,5l$  до  $0,2l$  погрешность возрастает в 1,5 раза. По этой причине сопротивление магазина  $R_3$  стремится подобрать таким, чтобы баланс моста достигался около середины реохорда.

В этих условиях процесс измерений сводится к установке с помощью магазина сопротивления близкого по величине к измеряемому  $R_x$ , и в дальнейшем к отысканию с помощью реохорда поло-

жения движка, соответствующего  $I_G=0$ . Очевидно, что при  $l_1 = \frac{l}{2}$ , т. е.  $l_1 = l_2$  и при  $I_G=0$ :

$$R_x = R_3.$$

Поскольку проводник реохорда никогда не бывает полностью однородным по всей своей длине, отношение длин отрезков  $l_1$  и  $l_2$  не является точно равным отношению  $R_x / R_3$ . Поэтому при измерениях обычно проводят коммутирование сопротивлений  $R_x$  и  $R_3$  (т. е. их меняют местами в схеме) с тем, чтобы при окончательном расчете  $R_x$  использовать среднее арифметическое каждой из  $l_1$  и  $l_2$ , найденных при двух положениях коммутатора.

Одинарные мосты постоянного тока по схеме Уитстона находят широкое применение для измерения сопротивлений от 1 до  $10^{10}$  Ом. В некоторых случаях их диапазон может быть расширен до  $10^{-4}$  и  $10^{15}$  Ом. Правда, при измерении очень больших сопротивлений инструментальная погрешность может превышать 10%.

Промышленность выпускает приборы, работающие по мостовой схеме Уитстона, в которых процесс измерения проводится в автоматическом или полуавтоматическом режиме и результат выводится в виде цифр на индикаторном табло (рис. 4).



Рис. 4. Промышленный мост Уитстона

Для измерения малых сопротивлений от 1 мкОм до 1 Ом применяют двойные или многоплечные мосты. Также находят применение комбинированные одинарно-двойные мосты, позволяющие измерять сопротивления от 1 мкОм до 1 МОм с погрешностью 0,002%.

При использовании моста Уитстона в режиме несбалансированного моста определяется напряжение в измерительной диагонали моста. Именно такой подход применяется в тензометрических схемах.

## 5. Виды мостовых схем

Одинарные мосты могут работать также и на переменном токе. Обобщенная электрическая схема такого моста изображена на рис. 5. В этом случае сопротивления плеч являются комплексными величинами. Индикатором нуля в такой схеме обычно служит электронный милливольтметр. В некоторых случаях в качестве электронного индикатора нуля может выступать электроннолучевая трубка осциллографа. Электронные индикаторы имеют очень большое входное сопротивление, что выгодно отличает их от электромеханических устройств, например, гальванометра.

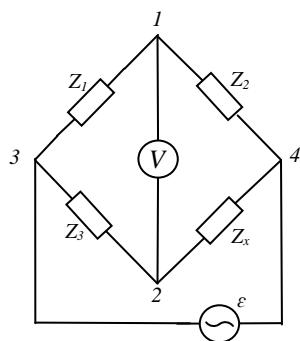


Рис. 5. Измерительный мост переменного тока

Условие равновесия одинарного моста на рис. 5 запишется следующим образом:

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3,$$

где  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$  - комплексные сопротивления плеч моста.

В качестве регулируемых элементов в таких схемах могут выступать резисторы и конденсаторы, т. к. они допускают более тонкую регулировку, чем катушки индуктивности.

Поскольку результаты измерения емкости и индуктивности зависят от частоты питающего мост напряжения источника, измерения проводят при заданной частоте. Равновесие моста переменного тока обычно добиваются регулировкой не одного, а двух элементов. Наиболее распространенные измерительные мосты переменного тока работают на сетевой частоте (50...60) Гц, либо на звуковых частотах вблизи 1 кГц.

Как известно, комплексные сопротивления состоят из активной и реактивной составляющей. Поэтому полное сопротивление (импеданс) цепи равно:

$$Z = \sqrt{X^2 + R^2},$$

где  $X_C = \frac{1}{\omega C}$ ;  $X_L = \omega L$ , где  $\omega$  - частота переменного тока источника.

Сложение реактивных составляющих подчиняется более сложным правилам, чем в случае активных сопротивлений. Так, например, для последовательного соединения катушки и конденсатора справедливо следующее соотношение:

$$X = \omega L - \frac{1}{\omega C},$$

а для параллельного соединения:

$$X = \frac{\omega L}{\omega^2 LC - 1}.$$

В этих соотношениях учтен тот факт, что переменные ток и напряжение на катушке и конденсаторе отличаются по фазе колебаний.

Для точных измерений индуктивности и добротности катушек используется мост Максвелла-Вина, изображенный на рис. 6. Такой мост позволяет производить сравнение эталонной катушки с

эталонными емкостями в случае неизвестной рабочей частоты. Использование эталонных емкостей оказывается гораздо выгоднее, поскольку емкости проще по конструкции, чем катушки; их легче экранировать, и они не создают внешних электромагнитных полей. Последнее обстоятельство является критически важным, т. к. измерительные мосты необходимо тщательно заземлять и экранировать, чтобы паразитные емкости между разными частями схемы не вносили ошибку при достижении равновесия моста.

Условие равновесия для измерительного моста рис. 6 записывается следующим образом:

$$L_x = R_2 R_3 C_1;$$

$$R_x = \frac{R_2 R_3}{R_1}.$$

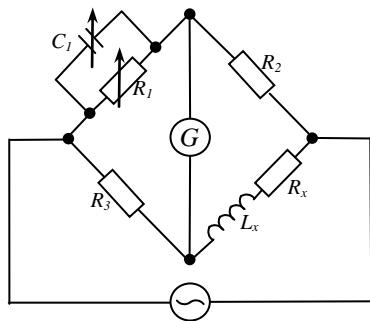


Рис. 6. Мост Максвелла-Вина

Преимущество мостовой схемы Максвелла-Вина в том, что она позволяет получить равновесие, даже если в сигнале источника питания присутствуют дополнительные гармоники с частотами, отличными от рабочей частоты, если величина  $L_x$  не зависит от частоты.

В современных мостах, выпускаемых промышленностью, процесс уравновешивания автоматизирован, и результат измерений выводится на цифровом индикаторном устройстве. Такие мосты называют цифровыми мостами (рис. 7).



Рис. 7. Промышленный мост Максвелла-Вина

## 6. Порядок выполнения лабораторной работы

### Задание 1. Измерение неизвестного сопротивления $R_x$

1. Соберите электрическую схему лабораторной установки согласно рис. 2 и рис. 8. Включите в схему неизвестное сопротивление  $R_x$ .

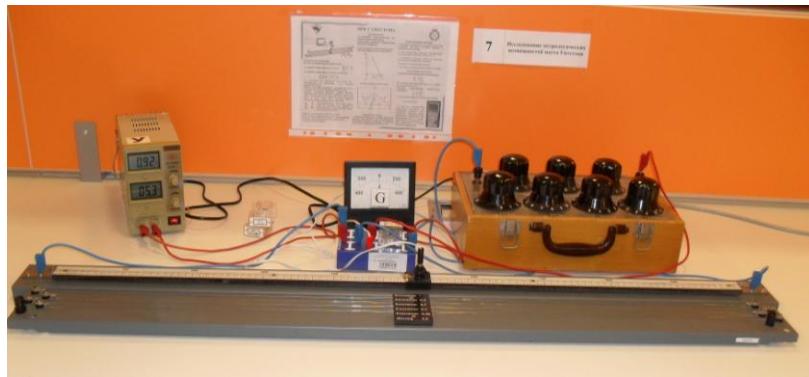


Рис. 8. Внешний вид лабораторной установки

2. Включите в схему в качестве  $R_3$  магазин сопротивлений MCP-63. Перед включением источника питания вынуть один из идущих от него проводов. Включить и выставить на источнике питания напряжение **не более 5 В**. После чего подключить провод обратно.

3. Выставите на магазине сопротивлений значение порядка  $R_3 = 100$  Ом. Движок реохорда установите приблизительно на середину шкалы.
4. Замкните на короткое время движок реохорда и зафиксируйте в какую сторону отклонится стрелка гальванометра. **Кнопку не следует держать нажатой долго, чтобы реохорд и сопротивления не успевали нагреться.**
5. Измените сопротивление магазина и снова нажмите движок реохорда. Если стрелка гальванометра отклонится в противоположную сторону по сравнению с п. 4, то сопротивление магазина уменьшите вдвое. Вращая ручки магазина, включая младшие декады, добейтесь, чтобы стрелка гальванометра почти дошла до нулевого значения.
6. Теперь, перемещая движок реохорда, добейтесь значения  $I_G = 0$ .
7. Запишите полученные значения сопротивления  $R_3$  и длины плеч реохорда  $l_1$  и  $l_2$  в таблицу 1.

Таблица 1.

| № опыта | $R_3$ , Ом | $l_1$ , м | $l_2$ , м | $R_x$ , Ом |
|---------|------------|-----------|-----------|------------|
| 1       |            |           |           |            |
| 2       |            |           |           |            |
| 3       |            |           |           |            |
| 4       |            |           |           |            |
| 5       |            |           |           |            |
| 6       |            |           |           |            |
| 7       |            |           |           |            |

8. Рассчитайте значение неизвестного сопротивления по формуле 7 и запишите в соответствующий столбец таблицы 1.
9. Сместите движок реохорда влево от середины реохорда на 10 мм и подбором сопротивления магазина добейтесь равновесия моста  $I_G = 0$ . Запишите полученные значения сопротивления  $R_3$  и длины плеч реохорда  $l_1$  и  $l_2$  в таблицу 1.
10. Повторите п. 9 при положении движка реохорда, смещенного на 15 и 20 мм влево от центра реохорда. Запишите полученные значения сопротивления  $R_3$  и длины плеч реохорда  $l_1$  и  $l_2$  в таблицу 1.

11. Повторите п.п. 9 и 10, перемещая движок реохорда вправо от центра реохорда на 10, 15 и 20 мм. Запишите полученные значения сопротивления  $R_3$  и длины плеч реохорда  $l_1$  и  $l_2$  в таблицу 1.

**Задание 2. Измерение сопротивления проволоки из константана**

1. Соберите электрическую схему лабораторной установки согласно рис. 2 и рис. 8. Включите в схему в качестве неизвестного сопротивления проволоку из константана диаметром 1 мм и длиной 1 м.

2. Включите в схему в качестве  $R_3$  магазин сопротивлений MCP-63.

Выставите на источнике питания напряжение **не более 5 В**. **Обратите внимание, на то, что при подключении источника тока к мосту Уитстона напряжение на источнике может значительно уменьшиться. При этом не надо увеличивать напряжение, стремясь достичь 5 В!**

3. Выставите на магазине сопротивлений значение порядка 5 Ом. Движок реохорда установите приблизительно на середину шкалы.

4. Повторите все действия, описанные в п.п. 4-11 задания № 1. Полученные значения сопротивления  $R_3$  и длины плеч реохорда  $l_1$  и  $l_2$  запишите в таблицу 2.

5. Рассчитайте значение сопротивления константановой проволоки  $R_x$  по формуле 7 и запишите в соответствующий столбец таблицы 2.

6. Повторите все п.п. 1-5 данного задания № 2 для проволок из константана диаметром 0,7 и 0,5 мм. Обратите внимание на то, что для каждого диаметра проволоки потребуется провести 7 опытов. Поэтому заранее оставьте достаточно места для таблицы 2.

Таблица 2.

| Диаметр проволоки, $d$ , мм | $R_3$ , Ом | $l_1$ , м | $l_2$ , м | $R_x$ , Ом | $\rho$ , Ом м |
|-----------------------------|------------|-----------|-----------|------------|---------------|
| ---                         |            |           |           |            |               |
| ---                         |            |           |           |            |               |

**Задание 3. Измерение сопротивления проволоки из неизвестного материала**

1. Соберите электрическую схему лабораторной установки согласно рис. 2 и рис. 8. Включите в схему в качестве неизвестного сопротив-

ления проволоку из неизвестного материала диаметром 0,35 мм и длиной 1 м.

2. Включите в схему в качестве  $R_3$  магазин сопротивлений MCP-63.

Выставите на источнике питания напряжение **не более 5 В**. Обратите внимание, на то, что при подключении источника тока к мосту Уитстона напряжение на источнике может значительно уменьшиться. При этом не надо увеличивать напряжение, стремясь достичь 5 В!

3. Выставите на магазине сопротивлений значение порядка 10 Ом. Движок реохорда установите приблизительно на середину шкалы.

4. Повторите все действия, описанные в п.п. 4-11 задания № 1. Полученные значения сопротивления  $R_3$  и длины плеч реохорда  $l_1$  и  $l_2$  запишите в таблицу 3.

5. Рассчитайте значение сопротивления проволоки из неизвестного материала  $R_x$  по формуле 7 и запишите в соответствующий столбец таблицы 3.

Таблица 3.

| № опыта | $R_3$ , Ом | $l_1$ , м | $l_2$ , м | $R_x$ , Ом | $\rho$ , Ом м |
|---------|------------|-----------|-----------|------------|---------------|
| 1       |            |           |           |            |               |
| 2       |            |           |           |            |               |
| 3       |            |           |           |            |               |
| 4       |            |           |           |            |               |
| 5       |            |           |           |            |               |
| 6       |            |           |           |            |               |
| 7       |            |           |           |            |               |

## 7. Обработка результатов измерений

### Задание 1.

1. Согласно результатам табл. 1 для каждого опыта найти значения неизвестного сопротивления.

2. Для каждого значения сопротивления рассчитать абсолютную и относительную погрешность косвенных измерений.

**Задание 2.**

1. Согласно результатам табл. 2 для каждого опыта найти значения сопротивления константановой проволоки разного диаметра.
2. Для каждого значения сопротивления рассчитать абсолютную и относительную погрешность косвенных измерений.
3. По формуле (2) найти значение удельного сопротивления константана  $\rho$  для каждого опыта и рассчитать абсолютную и относительную погрешность косвенных измерений.
4. Построить график зависимости  $R_x = f\left(\frac{1}{d^2}\right)$ , где  $d$  - диаметр проволоки из константана. По угловому коэффициенту построенной прямой:

$$\rho_{\text{гр}} = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta R_x}{\Delta \left( \frac{1}{d^2} \right)}$$

определить графическое значение удельного сопротивления константановой проволоки  $\rho_{\text{гр}}$ .

5. Сравнить полученные значения удельного сопротивления константана  $\rho$  и  $\rho_{\text{гр}}$  со справочными значениями для константана.

**Задание 3.**

1. Согласно результатам табл. 3 для каждого опыта найти значения сопротивления проволоки из неизвестного материала.
2. Для каждого значения сопротивления рассчитать абсолютную и относительную погрешность косвенных измерений.
3. По формуле (2) найти значение удельного сопротивления неизвестного материала  $\rho$  для каждого опыта и рассчитать абсолютную и относительную погрешность косвенных измерений.
4. Сравнить полученные значения удельного сопротивления неизвестного материала  $\rho$  со справочными значениями и определить тип материала проволоки.

**Класс точности магазина сопротивлений MCP-63 равен 0,05!**

### **Контрольные вопросы**

1. Какая электрическая схема называется одинарным мостом постоянного тока? Нарисуйте ее.
2. Какие существуют методы измерения сопротивлений? Какие преимущества и недостатки они имеют по сравнению с мостовым методом?
3. Что такое сбалансированный и несбалансированный мост Уитстона? Как измерить неизвестное сопротивление в случае сбалансированного и несбалансированного моста?
4. Что такое реохордный мост и какие у него преимущества по сравнению с другими мостовыми схемами?
5. Оцените погрешность метода измерения с помощью моста Уитстона. При каком условии погрешность данного метода будет минимальной?
6. Перечислите примеры практического применения мостовой схемы Уитстона.
7. Запишите правила Кирхгофа для несбалансированного моста Уитстона и выведите из них условие равновесия моста.
8. Оцените для лабораторной установки верхний и нижний пределы измеряемых сопротивлений.
9. Как можно использовать мостовую схему для измерения реактивных сопротивлений?

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Калашников Н.П. Основы физики. М.: Дрофа, 2004. Т. 1
2. Савельев И.В. Курс физики. СПб.: Лань, 2016. Т. 2.
3. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М.: ACADEMIA, 2005.
4. Иродов И.Е. Электромагнетизм. М.: Лань, 2009.
5. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Академия, 2015.
6. Детлаф А.А., Яворский Б.М.. Справочник по физике. М.: Наука, 2008.

## **СОДЕРЖАНИЕ**

|   |    |
|---|----|
| 1. Введение.....  | 3  |
| 2. Методы измерения электрического сопротивления.....   | 4  |
| 3. Одинарный мост постоянного тока (Мост Уитстона)..... | 5  |
| 4. Расчет моста Уитстона с помощью правил Кирхгофа..... | 8  |
| 5. Виды мостовых схем.....                              | 14 |
| 6. Порядок выполнения лабораторной работы.....          | 17 |
| 7. Обработка результатов измерений.....                 | 20 |
| Контрольные вопросы.....                                | 22 |
| Библиографический список .....                          | 22 |