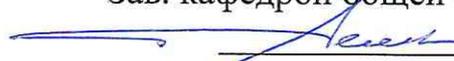


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УТВЕРЖДАЮ:  
Зав. кафедрой общей физики ФТИ

 А.М. Лидер  
«    »                      2017 г.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ МОСТА  
УИТСТОНА**

Методические указания к выполнению лабораторной работы №2-04  
по курсу «Общая физика» для студентов всех специальностей

Томск 2017

УДК 537

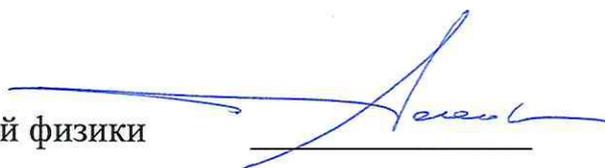
Методические указания к выполнению лабораторной работы № 2-04 по курсу «Общая физика» по теме «Постоянный ток» для студентов всех направлений и специальностей очной и заочной форм обучения. Томск, изд. ТПУ, 2017, 12 стр.

Составители: Мурашкина Т.Л., ассистент КОФ ТПУ

Рецензенты: Ларионов В.В., профессор КОФ ТПУ  
Мельникова Т.Н., ст. преподаватель КОФ ТПУ

Методическое пособие рассмотрено и рекомендовано методическим семинаром кафедры общей физики «\_\_»\_\_\_\_\_ 2017 г.

Зав. кафедрой общей физики



А.М. Лидер

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ МОСТА УИТСТОНА

**Цель работы:** Изучение принципа работы измерительной мостовой схемы. Определение неизвестного сопротивления с помощью мостика Уитстона; проверка закона параллельного и последовательного соединения сопротивлений; определение удельного сопротивления проводника.

**Приборы и принадлежности:** реохорд, набор резисторов с неизвестными (в проволочном виде) и известными сопротивлениями, цифровой мультиметр, источник постоянного тока, мост Уитстона.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

В технике измерений *электрическим мостом* называют электрический прибор для измерения сопротивлений, емкостей, индуктивностей и других электрических величин, представляющих собой измерительную мостовую цепь, действие которой основано на методике сравнения измеряемой величины с образцовой мерой. Мостовые схемы используют индикатор баланса для сравнения двух напряжений, точно так же как и лабораторные весы сравнивают две массы и указывают на то, что они равны. В отличие от «потенциометрических» схем, используемых для простого измерения неизвестного напряжения, мостовые схемы могут использоваться для измерения всех видов электрических величин, в том числе и сопротивлений с высокой точностью.

Стандартная мостовая схема, часто называемая *мостом Уитстона* (Wheatstone bridge), изображена на рис. 1.

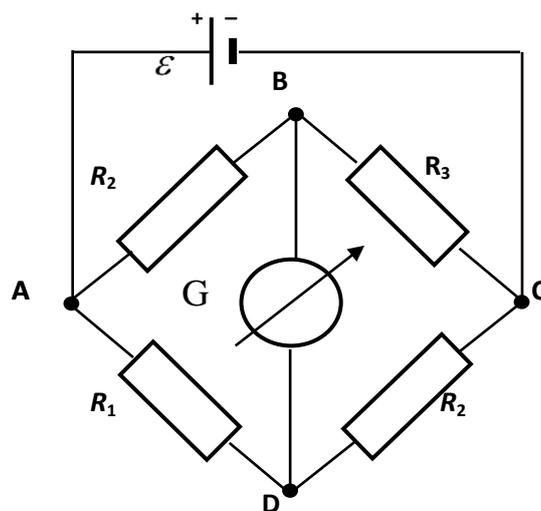


Рис. 1. Мост Уитстона

Классическая мостовая цепь состоит из четырех сопротивлений  $R_1, R_2, R_3, R_4$ , соединенных последовательно в виде четырехугольника (рис. 1), причем точки  $A, B, C, D$  называют вершинами. Ветвь  $AC$ , содержащая источник питания  $U_n$ , называется диагональю питания, а ветвь  $BD$ , содержащая сопротивление нагрузки  $R_H$ , – диагональю нагрузки. Сопротивления  $R_1, R_2, R_3, R_4$ , включенные между двумя соседними вершинами, называются *плечами мостовой цепи*.

Название «мостовая цепь» объясняется тем, что диагонали, как мостики, соединяют две противоположные вершины (диагональ нагрузки, например, ранее так и называлась – мост). Схема, представленная на рис. 1, известна в литературе как четырехплечный мост, или мост Уитстона. В данной лабораторной работе используется одна из разновидностей моста Уитстона, которая позволяет проводить измерения величин активных сопротивлений.

Мосты Уитстона считаются превосходным средством измерения сопротивления среди схем различных омметров. В отличие от нелинейных схем, имеющих нелинейные шкалы, и связанные с этим погрешности измерений, мостовая схема является линейной и довольно точной. Математика описания её работы основана на простых отношениях и пропорциях.

Имея стандартные сопротивления достаточной точности и нуль-детектор с необходимой чувствительностью, достижимая точность измерения сопротивления может быть не хуже  $\pm 0,05$  % при использовании моста Уитстона. Это метод измерения сопротивления предпочитают использовать в калибровочных лабораториях из-за его высокой точности.

Существует много вариаций основной схемы моста Уитстона. Большинство мостов постоянного тока используются для измерения сопротивления, в то время как мосты переменного тока могут быть использованы для измерения различных электрических величин, таких как индуктивность, ёмкость и частота.

Так, например, мост Уитстона используется для определения изменения сопротивления тензорезистора (тензодатчика), «измеряющего» изменение давления, температуры, распределение деформаций (изгиб или сжатие-растяжение) в конструктивных элементах зданий, сооружений, в сводах подземных выработок и многое другое. Причем, из-за высокой чувствительности мостика к дисбалансировке, тензочувствительность датчиков также высока, что способствует измерению даже микродислокаций (микродавлений и т.п.) в исследуемом объекте.

## УСЛОВИЕ РАВНОВЕСИЯ МОСТА УИТСТОНА

Основной электрической характеристикой проводника является его *сопротивление*. Сопротивление представляет собой меру противодействия установлению в проводнике электрического тока. Зависит сопротивление проводника от его геометрии и электрических свойств его материала. Проводник длиной  $l$  с постоянным сечением  $S$  обладает сопротивлением  $R$ :

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (1)$$

Здесь  $\rho$  – зависящая от материала проводника и его состояния величина, называемая *удельным сопротивлением*.

В настоящей работе для измерения сопротивлений использован *линейный мост Уитстона*. Электрическая схема моста представлена на рис. 2. В мост включены: известное сопротивление  $R_m$ , неизвестное сопротивление  $R_x$ , реохорд или аналогичная система, имеющая однородный участок  $AC$  с постоянным по всей длине удельным сопротивлением.

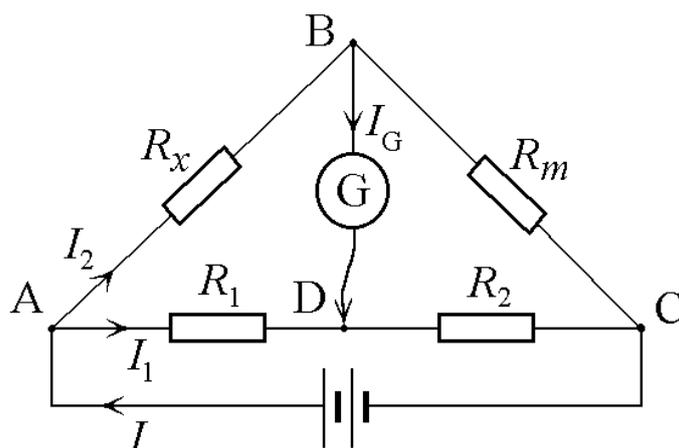


Рис. 2. Линейный мост Уитстона

При произвольных значениях сопротивлений через гальванометр  $G$  будет течь ток того или иного направления. Однако сопротивления можно подобрать таким образом, что ток в гальванометре ответвляться не будет ( $I_g = 0$ ). В этом случае потенциалы точек  $B$  и  $D$  будут равны ( $\varphi_B = \varphi_D$ ). Такое состояние называют *равновесием моста*.

Установим зависимость, которая существует между сопротивлениями  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_m$ ,  $R_x$  в этот момент.

По первому правилу Кирхгофа  $\sum_i I_i = 0$  в точке  $B$  и  $D$  сумма токов равна нулю, т.е. при условии  $I_g = 0$  получаем равенство токов:

$$I_{AB} = I_{BC} \text{ и } I_{AD} = I_{DC}. \quad (2)$$

По второму правилу Кирхгофа  $\sum_i I_i R_i = \sum_i \mathcal{E}_i$  для контуров  $ABDA$  и  $BCDB$  можно записать:

$$\begin{aligned} I_{AD} \cdot R_1 &= I_{AB} \cdot R_x \\ I_{CD} \cdot R_2 &= I_{BC} \cdot R_m \end{aligned} \quad (3)$$

Из последних уравнений вытекает соотношение

$$R_x = R_m \frac{R_1}{R_2}. \quad (4)$$

Сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  для линейной схемы моста Уитстона лежат на одной прямой  $AC$ , называемой реохордом, и представляют собой однородную проволоку (струну), по которой на скользящем контакте перемещается движок  $D$ , соединенный с гальванометром  $G$ . Вследствие того, что проволока реохорда однородна и тщательно откалибрована (имеет везде одинаковое поперечное сечение), отношение сопротивлений участков цепи  $AD$  (сопротивление  $R_1$ ) и  $DC$  (сопротивление  $R_2$ ) можно заменить отношением соответствующих длин плеч реохорда  $l_1$  и  $l_2$  (на основании прямо пропорциональной зависимости  $R(l) = \rho \frac{l}{S}$ ):

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

Тогда окончательная формула для определения искомого сопротивления имеет вид:

$$R_x = R_m \frac{l_1}{l_2}. \quad (5)$$

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Внешний вид экспериментальной установки представлен на рис. 3.

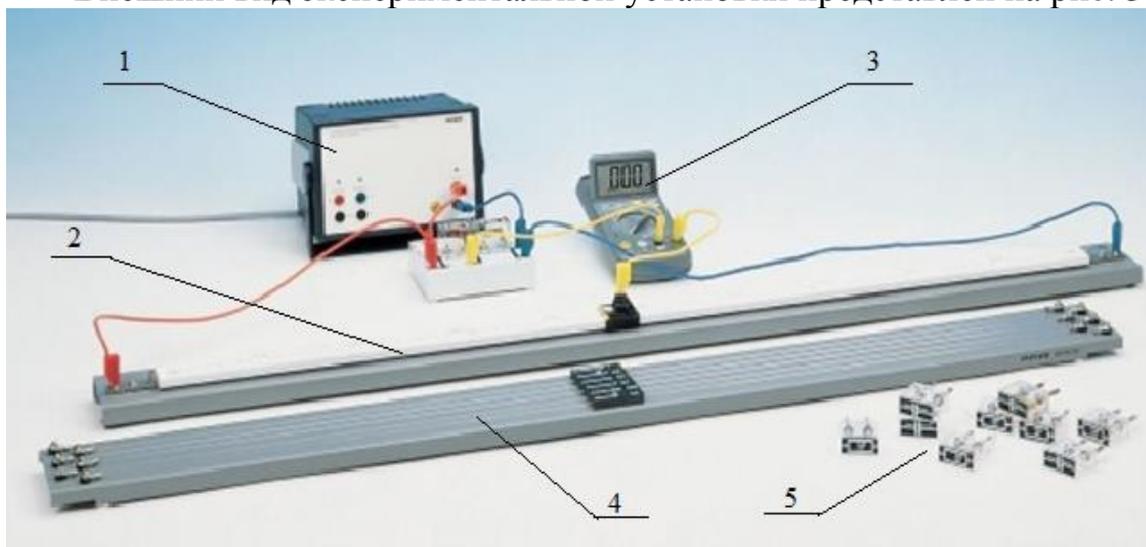


Рис. 3. Экспериментальная установка. 1 – источник постоянного тока, 2 – реохорд, 3 – цифровой мультиметр, 4 – проводник с неизвестным сопротивлением, 5 – набор проводников с известным сопротивлением

Ветвь мостика Уитстона  $ADC$  изготавливается из однородной металлической проволоки (струны) длиной 1 метр, имеющей всюду одинаковое поперечное сечение. Струна натягивается на миллиметровую шкалу (такую струну часто называют реохордом), вдоль струны скользит движок  $D$ , соединенный с мультиметром. Типы струн приведены в таблице 1.

В качестве гальванометра используется мультиметр, который можно включить как в режим амперметра, так и в режим вольтметра.

Таблица 1

### Перечень используемых струн

№ струны	Материал	Диаметр, мм
1	Константан (CuNi44)	1
2	Константан (CuNi44)	0,5
3	Константан (CuNi44)	0,7
4	Константан (CuNi44)	0,7
5	Константан (CuNi44)	0,35
6	Латунь (CuZn37)	0,5

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### Упражнение 1

#### Определение неизвестного сопротивления

1. Соберите схему, изображенную на рис. 2. В качестве неизвестного сопротивления  $R_x$  выберите произвольную струну из таблицы 1 (по указанию преподавателя). Резисторы с известным сопротивлением  $R_m$  в количестве 3-4 подбираются произвольно (предпочтительно использовать резисторы с сопротивлениями 1 Ом, 2 Ом, 5 Ом и 10 Ом).
2. Включите источник тока. Передвигая подвижный контакт реохорда, найдите точку равновесия путем поиска нулевых показаний гальванометра (используйте мультиметр в режиме вольтметра с диапазоном 20 V). Результаты измерений занесите в таблицу 2.

Таблица 2

$R_m$ , Ом	$l_1$ , м	$l_2$ , м	$R_x$ , Ом	$R_x$ ср, Ом
1				
2				
5				
10				

3. Рассчитайте значение неизвестного сопротивления по формуле (5) и вычислите его среднее значение.
4. Рассчитайте погрешность косвенных измерений  $\Delta R$ . Результаты запишите в отчет в виде:

$$R_x = \bar{R} \pm \Delta R.$$

### УПРАЖНЕНИЕ 2

#### Определение удельного сопротивления материала проволоки

1. Проведите измерения сопротивления  $R_x$  для 4-х струн разного диаметра (№ 1, 2, 3, 5) с использованием не менее трех резисторов с известными сопротивлениями  $R_m$ .
2. Результаты измерений занесите в таблицу 3, рассчитайте для каждого неизвестного сопротивления (по формуле 5) его среднее значение.

Таблица 3

№ струны	$R_m$ , Ом	$l_1$ , м	$l_2$ , м	$d$ , м	$\frac{1}{d^2}$ , м <sup>-2</sup>	$R_x$ , Ом	$R_x$ ср, Ом
1							
2							
3							
5							

3. По полученным результатам постройте график зависимости сопротивления проволоки от ее диаметра  $R_x = f\left(\frac{1}{d^2}\right)$ . Пользуясь формулой (6), по угловому коэффициенту построенной прямой  $tg\alpha = \frac{\Delta R_x}{\Delta\left(\frac{1}{d^2}\right)}$  определите удельное сопротивление материала проволоки.

$$\rho = tg\alpha \cdot \frac{\pi}{4\ell} \quad (6)$$

4. Определите тип материала по сравнению полученного значения удельного сопротивления проволоки со справочными данными.

### УПРАЖНЕНИЕ 3

#### Определение сопротивления при последовательном и параллельном соединениях проводников

1. Соедините последовательно два неизвестных сопротивления (произвольные проводники № 1-5) и включите их в цепь как плечо  $AB$ . Измерьте общее сопротивление  $R_{x\text{ посл.}}$  для различных значений известного сопротивления. Результаты изменений внесите в таблицу 4.
2. Соедините параллельно два неизвестных сопротивления (произвольные проводники № 1-5) и включите их в цепь как плечо  $AB$ . Измерьте общее сопротивление  $R_{x\text{ паралл.}}$  для различных значений известного сопротивления. Результаты изменений внесите в таблицу 4.

Таблица 4

	$R_m, \text{ Ом}$	$l_1, \text{ м}$	$l_2, \text{ м}$	$R_x, \text{ Ом}$	$R_{x \text{ ср}}, \text{ Ом}$
$R_{x \text{ посл.}}$					
$R_{x \text{ паралл.}}$					

3. Рассчитайте среднее значение  $R_{x \text{ посл.}}$  и  $R_{x \text{ паралл.}}$ . Проверьте выполнение закона параллельного и последовательного соединения проводников.

## ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Как формулируются законы Кирхгофа?
2. Получите формулу, определяющую сопротивление последовательно и параллельно соединенных сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$ .
3. Что понимают под удельным сопротивлением? Удельной проводимостью?
4. В каких единицах измеряют удельное сопротивление? Проводимость?
5. Как определить сопротивление проводника, выполненного в виде трубки?
6. Рассчитайте сопротивление проводника, выполненного в виде трубки с отверстиями. Предложите оптимальную методику расчета.
7. Как рассчитать сопротивление проводника, имеющего переменное сечение? Задайте закон изменения площади сечения проводника и предложите формулу для его расчета.
8. Используя закон сохранения заряда, получите формулу, выражающую содержание 1-го закона Кирхгофа.
9. Какой прибор можно использовать в качестве нулевого индикатора мостика Уитстона?
10. Сформулируйте закон Ома в дифференциальной форме. Поясните это название.
11. Как направлены силовые линии электрического поля проводника с током, заряженного проводника без тока?
12. Как вычислить электрическое поле полого проводника с током внутри полости?
13. Вы измерили сопротивление проводника. Как измерить его емкость? Чему она равна?
14. С какой целью измерения проводят с различными известными резисторами?
15. Можно ли данным методом измерить сопротивление трубки, наполненной газом?
16. Какое сопротивление имеют диэлектрики, полупроводники? В чем их различие и каковы методики определения их сопротивления?
17. Объясните принцип работы омметра. Почему омметры имеют большое число шкал?
18. Чем определяется точность измерения сопротивления данным методом?
19. Как влияет температура проводника на величину измеряемого сопротивления?

20. Каждое сопротивление, как правило, рассчитано на определенную мощность. Для чего это делают?
21. В магазине при покупке сопротивления вам могут предложить сопротивления одинакового номинала, но различной стоимости. Чем определяется стоимость сопротивления?
22. Изучите маркировку сопротивлений, изготавливаемых в разных странах, и сделайте подробный отчет.
23. Определите температурные свойства струны реохорда и их влияние на точность измерения.
24. Какой источник тока используют для питания мостика Уитстона? Чем определяется его выбор?
25. Определите сопротивление проволочного куба, каждая сторона которого представляет собой одинаковое (разное) сопротивление.
26. Каков принцип работы измерительного моста?
27. Для чего служит нулевой индикатор? Какие приборы могут использоваться в качестве нулевого индикатора?
28. Что такое реохорд?

## ГЛОССАРИЙ

- 1. Гальванометр** – высокочувствительный прибор для измерения силы малых постоянных электрических токов. В отличие от обычных микроамперметров шкала гальванометра может быть проградуирована не только в единицах силы тока, но и в единицах напряжения, единицах других физических величин. Шкала может иметь условную, безразмерную градуировку, например, при использовании в качестве нуль-индикаторов.
- 2. Дислокации** – линейный дефект или нарушение кристаллической решётки твёрдого тела. Наличие дислокаций существенно влияет на механические и другие физические свойства твердого тела.
- 3. Мост Уитстона** (или мостик Уитстона, измерительный мост) – электрическая схема или устройство для измерения электрического сопротивления. Мост Уитстона относится к одинарным мостам в отличие от двойных мостов Томсона. Мост Уитстона — электрическое устройство, механическим аналогом которого являются аптекарские рычажные весы.
- 4. Мультиметр** (или **тестер**, **аво́метр**) – комбинированный электроизмерительный прибор, объединяющий в себе несколько функций. В минимальном наборе включает функции вольтметра, амперметра и омметра. Иногда выполняется мультиметр в виде токоизмерительных клещей. Существуют цифровые и аналоговые мультиметры.
- 5. Прецизионный** – обладающий высокой точностью или созданный с соблюдением высокой точности параметров; высокоточный.
- 6. Тензорезистор** – резистор, сопротивление которого изменяется в зависимости от его деформации. Тензорезисторы используются в тензометрии. С помощью тензорезисторов можно измерять деформации механически связанных с ними элементов. Тензорезистор является основной составной частью тензодатчиков, применяющихся для косвенного измерения силы, давления, веса, механических напряжений, крутящих моментов и пр.