

Министерство образования и науки Российской Федерации
НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-
СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (ННГАСУ)

Кафедра общей физики и теоретической механики

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ФИЗИКЕ

Выпуск 2. Электричество и магнетизм

Сборник методических указаний для выполнения лабораторных работ по физике

Нижний Новгород

ННГАСУ

2014

УДК 531.535

Лабораторные работы по физике. Выпуск 2. Электричество и магнетизм
Сборник методических указаний для выполнения лабораторных работ по физике, Нижний Новгород, ННГАСУ, 2014 г.

Настоящие методические указания предназначены для студентов ННГАСУ, обучающихся по направлениям «Строительство», «Теплоэнергетика» и др., в программу обучения которых входит изучение дисциплины физика. Методические указания содержат основные теоретические положения, описание методики и порядка выполнения ряда лабораторных работ по электричеству и магнетизму, описание используемого лабораторного оборудования.

Составители: Г.А. Маковкин, В.Г. Лапин, П.Н. Ермилов, Л.П. Коган, А.Б. Колпаков, Ю.П. Комаров, А.А. Краснов, В.Б. Штенберг.

© Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2014 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 22. МОСТИК УИТСТОНА КАК ПРИМЕР РАЗВЕТВЛЁННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ	4
Лабораторная работа № 28. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ ЖЕЛЕЗА	19
Лабораторная работа № 29. ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЛЬВАНОМЕТРА МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ	29
Лабораторная работа № 30. ИЗМЕРЕНИЕ ПОТЕРЬ НАПРЯЖЕНИЯ В ПРОВОДАХ	40
Лабораторная работа № 57. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ РЕЗИСТИВНОГО ПРОВОДА	47
Лабораторная работа № 62. ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ ИНДУКЦИОННЫМ МЕТОДОМ	54
Лабораторная работа № 63. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКА	71

МОСТИК УИТСТОНА КАК ПРИМЕР РАЗВЕТВЛЁННОЙ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ
Лабораторная работа № 22

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: Изучение методов расчёта разветвлённых электрических схем и использование мостика Уитстона для определения неизвестного сопротивления.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ И ЗАЩИТЫ ОТЧЁТА

При выполнении заданий по данной работе Вы на практике используете законы, связанные с протеканием электрического тока. Для эффективного усвоения материала предполагается следующий порядок работы.

1. До выполнения лабораторной работы Вам необходимо прочитать данные методические указания и повторить основные теоретические понятия, которые используются в работе.
2. Перед выполнением работы Вам необходимо сдать теоретический допуск. Для удовлетворения минимальным требованиям Вы должны уметь отвечать на вопросы разделов 1,2,3,6 методических указаний [1]. Эти методические указания имеются в библиотеке ННГАСУ, можно их также получить на кафедре в электронном виде.
3. После сдачи допуска, Вы проводите измерения и оформляете протокол, который показываете своему преподавателю, фиксирующему выполнение работы. Протокол измерений может быть один на бригаду студентов. Преподаватель назначает Вам дату защиты работы, к которой Вам следует оформить отчёт (обычно это следующее лабораторное занятие). Отчёт оформляется индивидуально и студент должен быть в состоянии объяснить все

мельчайшие нюансы, которые в нём содержатся. Перед защитой следует добиться полной ясности всех расчётов, содержащихся в отчёте, и понятия из каких физических законов и каким образом получают используемые формулы.

4. Защита лабораторной работы состоит в ответе на вопросы по отчёту, связанные с практическими измерениями, а также с демонстрацией студентом умения решать задачи по теме «Электрический ток». При подготовке рекомендуем, во-первых, убедиться, что Вы умеете решать простейшие задачи из разделов 1-6 методического пособия [1], а кроме того проанализировать задания в конце данной брошюры. В случае успешной защиты, преподаватель делает в журнале пометку о защите лабораторной работы студентом с указанием рейтингового балла.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА И ВЫВОД РАСЧЁТНОЙ ФОРМУЛЫ

Основные понятия.

Предположим, что имеется пять сопротивлений $R_1 - R_5$. Один из возможных способов их соединения изображён на следующей схеме (см. Рис.1). Подчеркнём, что на Рис.1 нет двух сопротивлений подключённых параллельно или последовательно. Это пример участка разветвлённой электрической цепи, который называется *мостиком Уитстона*.

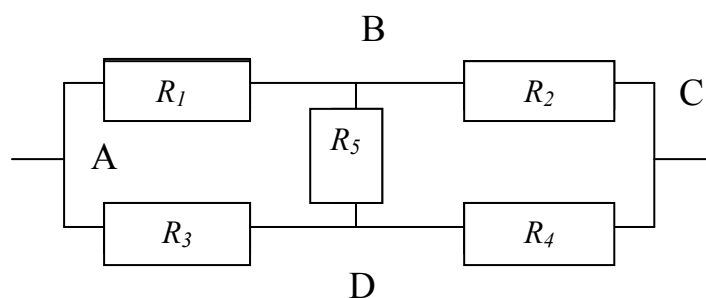


Рис. 1 Принципиальная электрическая схема соединения сопротивлений в мостик Уитстона.

Разветвлённая электрическая цепь всегда имеет **узлы**, т.е. *точки, в которых сходятся три или большее число проводников*. На приведённом рисунке имеется четыре узла, которые обозначены буквами А,В,С,Д. Важным является то, что в разных проводниках, сходящихся в узле, силы токов могут быть различными, т.е. при прохождении узла, сила тока меняется. *Участок цепи, расположенный между двумя соседними узлами*, называется **ветвью**. Мостик, изображённый на рисунке, имеет 5 ветвей это отрезки АВ,ВС,СД,ВД,АД. Очевидно, что ветвь является неразветвлённым участком цепи, поэтому сила тока во всех элементах ветви имеет одно и то же значение. Строго говоря, это является следствием стационарности распределений потенциала цепи и силы тока. Действительно, поскольку сила тока равна заряду, протекающему по проводнику за секунду, для того, чтобы заряд в точке ветви не накапливался, необходимо, чтобы ток, подходящий слева, был равен току, утекающему справа. Условие стационарности потока встречается в разных разделах физики, например в гидродинамике оно приводит к тому, что масса жидкости втекающая в неразветвлённый участок трубы равна массе вытекающей, что вполне аналогично сказанному про ветвь электрической цепи. Аналогия может быть продолжена и на другие аспекты настоящей работы. Если её развить, то можно будет рассчитывать течение жидкости по разветвлённой системе труб просто меняя обозначения величин в формулах настоящего пособия.

Заметим также, что ветви моста *АВ, ВС, АД, DC* в литературе называют **плечами мостика**, а ветвь *ВД* – **перемычкой**. Мостик называется **сбалансированным**, если ток через перемычку обращается в ноль. Баланс имеет место, если сопротивления плеч моста подчиняются определённому соотношению, которое будет получено далее. В сбалансированном мостике перемычку можно удалить, поскольку ток через неё отсутствует, поэтому вместо сбалансированного мостика получим две параллельных ветви *А-В-С* и *А-Д-С*, а расчёты для этого случая заметно упрощаются.

Разветвлённая электрическая цепь имеет **контуры** (так называют замкнутый участок цепи). На рис. 1 имеются три контура: $ABDA$, $BCDB$, $ABCD$. Для контуров удобно записывать баланс работы электрических и сторонних сил, поскольку при обходе контура разность потенциалов обращается в ноль.

Вывод расчётной формулы.

Мостик Уитстона подключают к источнику постоянного тока согласно рис.2, на котором вместо сопротивления R_5 в перемычке изображён гальванометр с внутренним сопротивлением R_2 , позволяющий непосредственно измерять электрический ток и судить о сбалансированности моста.

Произведем полный расчёт данной разветвлённой цепи, применяя правила Кирхгофа (см. Приложение). Будем считать, что все сопротивления и ЭДС известны, а задача состоит в нахождении всех токов. Из общих выражений будет следовать также условие балансировки моста, которое можно получить короче. При применении правил желательно действовать по следующей программе.

1. Расставляем стрелки - направления токов в ветвях и вводим для них обозначения (это сделано на рис. 2).
2. Применим первое правило Кирхгофа для $N-1$ узла цепи. На схеме число узлов $N=4$, поэтому мы запишем три уравнения для узлов A, B, D :

$$\begin{cases} -I_1 - I_3 + I = 0, & \text{(узел A)} & (1) \\ +I_1 - I_2 - I_2 = 0, & \text{(узел B)} & (2) \\ +I_3 - I_4 + I_2 = 0. & \text{(узел D)} & (3) \end{cases}$$

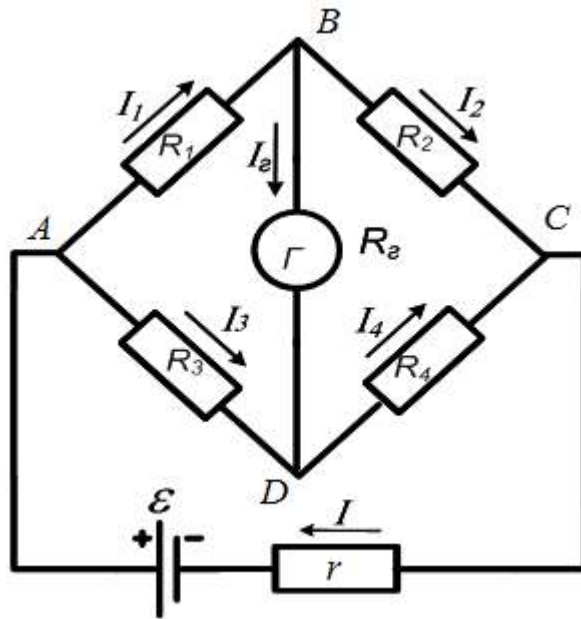


Рис. 2 Подключение мостика к источнику тока

Заметим, что если сложить правые и левые части этих уравнений, получим уравнение, которое могло быть получено для узла C при помощи первого правила Кирхгофа. Это означает, что уравнение для одного из узлов является следствием уравнений для других узлов и его использовать не нужно.

Поскольку в нашей задаче 6 неизвестных токов, нам необходимо для её решения ещё 3 независимых уравнения, которые могут быть получены для контуров с использованием второго правила Кирхгофа.

3. Выберем контуры $ABDA$, $BCDB$, $ABCA$, а также направление их обхода - по часовой стрелке (в порядке следования букв). Для независимости уравнений важно, чтобы каждый контур имел ветвь, которую не содержат другие, поэтому замена третьего контура на контур $ABCD$, содержащий те же ветви, что и первые два контура, была бы некорректной! Применение второго правила Кирхгофа приводит к уравнениям:

$$\begin{cases} +I_1R_1 - I_3R_3 + I_2R_2 = 0, & (\text{контур } ABDA) & (4) \\ +I_2R_2 - I_4R_4 - I_2R_2 = 0, & (\text{контур } BCDB) & (5) \\ +I_1R_1 + I_2R_2 + I \cdot r = \varepsilon. & (\text{контур } ABCA) & (6) \end{cases}$$

Решая систему уравнений (1)-(6), можно найти токи во всех ветвях по известным сопротивлениям и ЭДС. В других постановках задачи полученные соотношения также могут быть использованы для определения других неизвестных величин, если некоторые токи известны. Решение полученной системы можно компактно записать, используя метод решения, называемый правилом Крамера. Если расположить неизвестные в следующем порядке $(I_1, I_2, I_3, I_4, I_2, I)$, определитель Δ матрицы полученной системы шести уравнений примет вид:

$$\Delta = \begin{vmatrix} -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 1 & 0 \\ R_1 & 0 & -R_3 & 0 & R_2 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 & -R_4 & R_2 & 0 \\ R_1 & R_2 & 0 & 0 & 0 & r \end{vmatrix}.$$

В раскрытом виде это выражение представляет собой сумму большого числа положительных слагаемых, поэтому никогда не обращается в ноль (что является следствием линейной независимости уравнений). Выражение для тока I_2 (пятая неизвестная) может быть получено, если взять определитель матрицы системы с заменённым пятым столбцом на столбец свободных членов и поделить этот определитель на Δ :

$$I_2 = \Delta^{-1} \cdot \begin{vmatrix} -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ R_1 & 0 & -R_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 & -R_4 & 0 & 0 \\ R_1 & R_2 & 0 & 0 & \varepsilon & r \end{vmatrix} = \frac{\varepsilon \cdot (R_2R_3 - R_1R_4)}{\Delta}. \quad (7)$$

Из полученного выражения видно, что ток через гальванометр обращается в ноль, если сопротивления мостика удовлетворяют условию:

$$R_1 R_4 = R_2 R_3. \quad (8)$$

Полученное условие балансировки мостика, используется в данной лабораторной работе для определения величины неизвестного сопротивления. Формула (7) позволяет вычислить силу тока в отсутствие баланса и также может быть использована для измерений. Она, с учётом рис. 2 в частности показывает, что ток направлен в направлении стрелки (т.е. от узла B к узлу D), если выражение в скобке положительно и в противоположную сторону, если скобка имеет отрицательное значение.

Формулу (8), как указывалось ранее, быстрее можно получить из формул (2)-(5), сразу положив в них $I_2=0$. При этом из формул (2)-(3) следует, что $I_1=I_2$,

$I_3=I_4$, а с учётом этого формулы (4)-(5) принимают вид:

$$\begin{aligned} I_1 R_1 &= I_3 R_3, \\ I_1 R_2 &= I_3 R_4. \end{aligned} \quad (9)$$

В результате деления правых и левых частей этих равенств получаем условие (8).

Заметим, что условие (9), означает, что падение напряжения на сопротивлениях R_1 и R_3 одинаковы, поэтому напряжение на гальванометре и его ток равны нулю. Значит условие (9) возможно написать и без правил Кирхгофа, гораздо быстрее, но для этого необходим опыт. Стандартный метод, использующий правила Кирхгофа иногда является громоздким, но всегда приводит к решению задачи без особых размышлений.

ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА

Общий вид экспериментальной установки, используемой в настоящей работе, показан на рис.3, на котором отмечены узлы схемы, соответствующие обозначениям рис.2. В реальности источник ε представляет собой

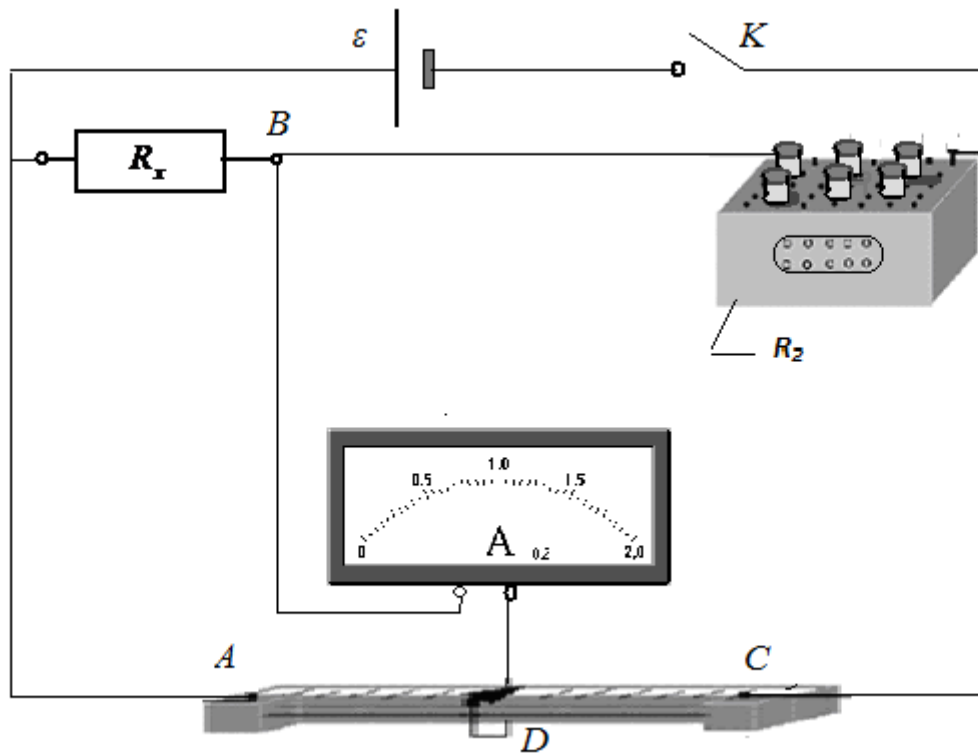


Рис. 3. Экспериментальная установка

выпрямитель и находится под столом установки. Видим, что вместо сопротивления R_1 подключается неизвестное сопротивление R_x , R_2 представляет собой магазин сопротивлений, на котором можно выставить различные величины, а сопротивления R_3 и R_4 конструктивно объединены и представляют собой реохорд – нихромовую проволоку длиной 50 см, по которой может перемещаться подвижный контакт (стрелочка на рис. 3). Передвижение контакта меняет длины отрезков проволоки l_1 (или AD) и l_2 (или DC), определяющие сопротивления R_3 и R_4 согласно формулам:

$$R_3 = \rho \cdot \frac{l_1}{S}, \quad R_4 = \rho \cdot \frac{l_2}{S},$$

где ρ – удельное сопротивление, а S – сечение проволоки. С учётов сказанного, из выражения (8) можем получить формулу расчёта неизвестного сопротивления:

$$R_x \equiv R_1 = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_4} = R_2 \cdot \frac{l_1}{l_2}. \quad (10)$$

Конструкция установки позволяет менять сопротивление магазина, добиваясь баланса мостика, когда справедлива формула (10). Баланса, т.е. обращения в нуль тока через гальванометр, можно также добиться, двигая ползунок реохорда. Обе эти возможности используются при измерениях.

В схеме имеется кнопочный размыкатель K , препятствующий длительному протеканию тока по проводникам для предотвращения их заметного нагрева.

В качестве неизвестных используются два сопротивления, которые подключают в схему по очереди в первой и второй серии измерений, а в третьей и четвёртой сериях измеряется сопротивление двух последовательно и параллельно соединённых сопротивлений. Перед началом каждой серии измерений Вам необходимо проверить правильность собранной схемы и показать её учебному мастеру.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

- 1) Проверить экспериментальную установку на предмет соответствия схеме представленной на рис. 3 и отсутствия повреждений. В том случае если имеются нарушенные контакты, их необходимо восстановить до подключения к сети. При более серьезных нарушениях (поломка приборов, обрывы проводов, и. т. д.) следует обратиться к преподавателю или лаборанту.
- 2) Подключить в качестве R_x первое из неизвестных сопротивлений, надёжно прикрутив винтовые контакты. Произвести первую серию, состоящую из трёх измерений.
 - а) В первом измерении добейтесь баланса подбором величины сопротивления магазина R_2 при равных плечах реохорда $l_1=l_2=0,25$ м. Это удобно сделать, взяв искомую величину «в вилку». Для этого установить наибольшую цифру в старшем барабане магазина, а остальные бараба-

ны на ноль и заметить направление отклонения стрелки прибора. Затем уменьшать цифру на старшем барабане, пока стрелка не отклонится в противоположную сторону. При найденной цифре на этом барабане повторить процедуру для барабана, имеющего следующую по старшинству цену деления, таким образом, увеличивая точность подбора R_2 . Прodelать эту операцию последовательно для всех барабанов, добиваясь максимальной точности подбора. Записать полученное значение в таблицу.

- b) Изменить сопротивление магазина на несколько десятков Ом и добиться баланса, передвигая контакт реохорда. Записать полученное значение R_2 и значения l_1, l_2 в Таблицу 1.
- c) Повторить пункт b), ещё раз изменив R_2 .
- 3) Повторить измерения, описанные в пункте 2), подключив в качестве R_x второе неизвестное сопротивление.
- 4) Подключите в качестве неизвестного сопротивления оба неизвестных сопротивления, соединённых последовательно. Прodelать серию измерений, описанную в пункте (2) с этими сопротивлениями.
- 5) Прodelать серию измерений, описанную в пункте (2) с двумя неизвестными сопротивлениями, соединив их параллельно.
- 6) Для каждого измерения вычислить R_x , для каждой серии из трёх измерений рассчитать среднее значение сопротивления R_{cp} .
- 7) Из формулы (10) получить формулу для вычисления погрешности и вычислить погрешность для каждой серии измерений.
- 8) Сравнить результаты непосредственного измерения последовательно и параллельного соединения сопротивлений с рассчитанными по формулам:

$$R_{\text{посл.}} = R'_X + R''_X, \quad \frac{1}{R_{\text{ПАР.}}} = \frac{1}{R'_X} + \frac{1}{R''_X}.$$

Сформулировать выводы.

Таблица 1

№ серии измерений (пункта в инструкции)	Результаты измерений				Расчёт	
	Измерение №	R_2	l_1	l_2	R_x	R_{cp}
2	<i>a</i>					
	<i>b</i>					
	<i>c</i>					
3	<i>a</i>					
	<i>b</i>					
	<i>c</i>					
4	<i>a</i>					
	<i>b</i>					
	<i>c</i>					
5	<i>a</i>					
	<i>b</i>					
	<i>c</i>					

КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

- 1) Объясните физический смысл (определение) и свойства следующий основных понятий: *электрический заряд, сила тока, плотность тока, разность потенциалов, ЭДС, падение напряжения (или напряжение на участке цепи), сопротивление, удельное сопротивление, узел, ветвь, контур*. Если возникают затруднения, можно прочитать

соответствующие разделы в методическом пособии [2] или более подробно в учебниках [3]-[4], имеющихся в библиотеке.

- 2) Убедитесь, что Вам известны следующие законы: *закон Ома для участка цепи и закон Джоуля – Ленца (в интегральной и дифференциальной формах), обобщённый закон Ома (для участка цепи с ЭДС), закон Ома для замкнутой цепи, закономерности, связанные с полной или полезной мощностями и к.п.д. источника в замкнутой цепи, законы (правила) Кирхгофа.*
- 3) Просмотрите вторые и третьи задачи во всех вариантах домашней контрольной работы в методическом пособии [2]. Постарайтесь решить те задачи, решения которых Вам не очевидны сразу после их прочтения. Все эти задачи взяты из задачника [5]. В задачнике есть ответы и даже краткие решения некоторых из этих задач. В случае затруднений советуем найти аналогичные задачи в «решебнике» [6] и проанализировать приведенные там решения. Следует сказать, что задачи в разных вариантах, как правило, аналогичны, поэтому многие из них можно будет не решать, поскольку решение будет аналогично уже рассмотренным задачам.
- 4) В какую сторону потечёт ток через гальванометр (вверх или вниз), если в сбалансированном мосте сопротивление магазина увеличить в 4 раза? На какое расстояние и в какую сторону нужно передвинуть ползунок реохорда, чтобы восстановить баланс (если было $l_1 = l_2$)?
- 5) Определить полное сопротивление участка цепи между точками *A* и *C* (смотри рис.1) при следующих значениях:
 - a) $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = 1 \text{ Ом};$
 - b) $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = 2 \text{ Ом};$
 - c) $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R \text{ Ом};$
 - d) $R_1 = R_4 = 2 \text{ Ом}, R_2 = R_5 = 1 \text{ Ом}, R_3 = 4 \text{ Ом};$

Указание: определите ток чрез R_5 в этих случаях.

- б) Более сложное задание для тех, кто претендует на высокую оценку. Определите полное (эффективное) сопротивление мостика при произвольных сопротивлениях его ветвей. Для получения численного ответа возьмите следующие значения:

$$R_1 = 1, R_2 = 2, R_3 = 3, R_4 = 4, R_5 = 5 \text{ Ом.}$$

Указание. Получите решение для I , аналогичное формуле (7) и сравните его с законом Ома для неразветвлённой замкнутой цепи, в которой мостик заменён эффективным сопротивлением.

Приложение. ПРАВИЛА КИРХГОФА ДЛЯ РАСЧЁТА РАЗВЕТВЛЁННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ

Правила (раньше называли законами) Кирхгофа позволяют написать уравнения, связывающие токи, сопротивления и ЭДС, включённых в произвольную разветвлённую электрическую цепь. Это сводит задачу о расчёте таких цепей к решению системы линейных алгебраических уравнений, которые можно написать для систем любого порядка. Таким образом, правила Кирхгофа являются стандартным методом расчёта разветвлённых схем.

1-ое правило Кирхгофа:

Сумма токов входящих равна сумме токов выходящих для каждого узла.

$$\sum I_{\text{вход}} = \sum I_{\text{вых}} .$$

Это утверждение можно сформулировать иначе:

Алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле равна нулю ($\sum (\pm I_i) = 0$), причём токи, входящие в узел берутся со знаком минус, а выходящие из него – со знаком плюс.

Сформулированный закон является прямым следствием закона сохранения электрического заряда. Он формулирует условия, необходимые для того, чтобы заряд не накапливался в узле.

2-ое правило Кирхгофа справедливо для любого контура разветвленной цепи.

Сумма (алгебраическая) ЭДС равна алгебраической сумме падений напряжения на всех элементах данного контура

$$\sum(\pm\varepsilon_i) = \sum(\pm I_j R_j),$$

где I_j - ток, текущий по j -ой ветви, полное сопротивление которой равно R_j .

Правило знаков подразумевает, что выбирается (произвольно) направление обхода контура.

- ЭДС > 0 , если при обходе контура ЭДС проходится от « $-$ » к « $+$ » (движение в направлении действия сторонней силы; в противоположном случае ЭДС берется со знаком минус).
- Аналогично знак падения напряжения выбирается « $+$ », если ток в элементе контура совпадает с направлением обхода контура и минус в противном случае.

Второй закон Кирхгофа может быть получен, если записать обобщённый закон Ома (для участка с ЭДС: $\Delta\varphi_j \pm \varepsilon_j = \pm I_j R_j$) для каждой ветви, входящей в контур при выбранном направлении его обхода. Если сложить правые и левые части полученных уравнений, то разность потенциалов исчезнет, поскольку для замкнутого контура она обращается в нуль.

Рекомендации по практическому применению. Перед применением правил Кирхгофа необходимо расставить токи на схеме цепи. Для этого в каждой ветви необходимо указать направление тока стрелкой и ввести его буквенное обозначение. При этом стрелку можно ставить в произвольном направлении, поскольку в сложной цепи направление токов может меняться в зависимости от параметров цепи и угадать истинное направление бывает невозможно. Если окажется, что при заданных параметрах цепи ток течет в направлении, противоположном стрелке, то в результате решения уравнений Кирхгофа соответствующий ток будет иметь отрицательное значение.

Если цепь имеет N узлов, первое правило Кирхгофа необходимо записать

для $N-1$ узла. Уравнение для N -го узла будет являться следствием уже написанных. Остальные независимые уравнения могут быть получены с использованием второго закона Кирхгофа. При этом каждый новый контур, для которого применяется этот закон, должен содержать хотя бы одну новую ветвь, не входящую в другие контуры.

Если придерживаться этих рекомендаций, то число полученных независимых уравнений будет равно числу ветвей цепи (или числу токов). Для определения неизвестных токов по заданным характеристикам элементов цепи необходимо решить линейную алгебраическую систему уравнений. Число уравнений равно числу неизвестных и равно числу ветвей. Решение этой задачи не представляет принципиальных трудностей (например, можно решать уравнения используя правило Крамера). Таким образом, правила Кирхгофа позволяют рассчитать произвольную разветвленную цепь.

Литература

- [1] Лапин В. Г. Тестовые вопросы по теме «Электричество и магнетизм». Методические указания для подготовки к защите лабораторных работ. // В. Г. Лапин, А.А. Краснов – Н.Новгород: ННГАСУ, 2006, 25с.
- [2] Лапин В. Г. Физика. Часть 3. Электричество и магнетизм. Учебное пособие. / В. Г. Лапин – Н.Новгород: ННГАСУ, 2003. 51 с.
- [3] Савельев И. В. Курс общей физики. Т.2 : Электричество и магнетизм. Волны. Оптика / И. В. Савельев. - Изд. 10-е, СПб. : Лань, 2008. - 496 с.
- [4] Фриш С. Э. Курс общей физики. Т.2 : Электрические и электромагнитные явления / С. Э. Фриш, А. В. Тиморева. - Изд. 11-е, - СПб. : Лань, 2007. - 519 с.
- [5] Волькенштейн В. С. Сборник задач по общему курсу физики / В.С. Волькенштейн. – СПб.: Книжный мир, 2006. – 327 с.
- [6] Трофимова Т.И. Курс физики. Задачи и решения : учеб. пособие для студентов втузов / Т.И. Трофимова, А. В. Фирсов. - М. : Изд. центр "Акад.", 2004. - 592 с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ ЖЕЛЕЗА

Лабораторная работа № 28

Целью настоящей работы является ознакомление с характеристиками магнитных свойств вещества и определение зависимости магнитной индукции и магнитной проницаемости ферромагнитного образца от напряженности поля.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Электрический ток создает в окружающем пространстве магнитное поле, которое действует на проводники с током и на движущиеся электрические заряды. Силовой характеристикой магнитного поля является вектор магнитной индукции. Модуль вектора магнитной индукции

$$B = \frac{M_{max}}{iS}, \quad (1)$$

где M - максимальный вращательный момент, действующий на малый контур с током; i - сила тока в контуре; S - площадь контура. Направление вектора \vec{B} определяется направлением положительной нормали к малому контуру (направление нормали к контуру связано с направлением тока в нем правилом правого винта (Рис.1)

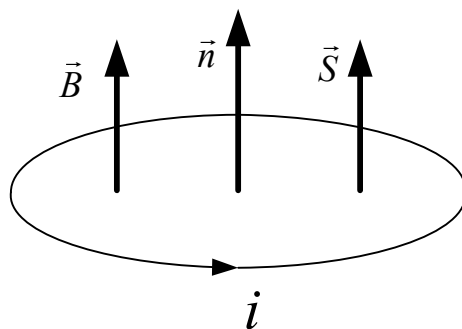


Рис.1

Единица магнитной индукции в СИ называется тесла (Тл) .

Всякое вещество под действием магнитного поля намагничивается, т.е. приобретает магнитный момент. Намагничивание объясняется существованием в веществе так называемых микроскопических токов, создаваемых движением электронов в атомах и молекулах и характеризующимся определенным магнитным моментом. В отсутствие внешнего магнитного поля ($\vec{B}_0=0$) магнитный момент тела равен нулю. Под действием внешнего магнитного поля ($\vec{B}_0 \neq 0$) магнитные моменты атомов приобретают преимущественную ориентацию в одном направлении, вследствие чего суммарный магнитный момент тела становится отличным от нуля.

Степень намагничивания характеризуют вектором \vec{J} намагниченности, который определяется магнитным моментом единицы объема тела.

При намагничивании магнитные поля микротоков отдельных атомов, вследствие их определенной ориентации, уже не компенсируют друг друга и создают в теле дополнительное поле $\vec{B}_{соб}$. Таким образом, вектор магнитной индукции характеризует результирующее магнитное поле, создаваемое всеми макро- и микротоками.

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_{соб} \quad (2)$$

Магнитное поле характеризуется также вектором напряженности \vec{H} , значение которого определяется только силой макротоков. Вектор \vec{H} связан простыми соотношениями с векторами \vec{B} и \vec{J} :

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu\mu_0} \quad (3)$$

$$\vec{J} = \chi \vec{H} \quad , \quad (4)$$

где χ - магнитная восприимчивость вещества,

$\mu = 1 + \chi$; μ - относительная магнитная проницаемость вещества,

$\mu_0 = 12,6 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ - магнитная постоянная.

χ и μ - величины безразмерные; единицей напряженности поля в СИ служит А/м.

В зависимости от величины и знака магнитной восприимчивости все вещества разделяются на три группы,

1. Диамагнетики, у которых $\chi < 0$ и мала, $\mu < 1$. Магнитные моменты атомов и молекул диамагнетика в отсутствие внешнего магнитного поля равны нулю. Внешнее магнитное поле приводит к появлению у атомов диамагнетика магнитных моментов, направленных противоположно направлению внешнего поля. Поэтому у диамагнетика направления векторов \vec{J} и \vec{H} противоположны.

2. Парамагнетики, у которых $\chi > 0$ и невелика, а $\mu > 1$. Атомы парамагнитных веществ имеют магнитные моменты и в отсутствие внешнего магнитного поля. Намагничивание парамагнитных тел обусловлено процессом преимущественной ориентации атомных магнитных моментов по направлению внешнего поля.

3. Особый класс веществ образуют ферромагнетики (железо, никель, кобальт и др.), намагниченность которых в огромное число раз превосходит намагниченность других веществ (диа- и парамагнетиков), а $\mu \gg 1$. Особенностью ферромагнетиков является также: 1) нелинейный характер зависимости \vec{J} и \vec{B} от напряженности поля \vec{H} ; 2) наличие гистерезиса, в результате которого \vec{J} (и \vec{B}) не является однозначной функцией H , а зависит от того, в каких магнитных полях образец побывал раньше.

На рис.2 дана кривая намагничивания ферромагнетика, магнитный момент которого первоначально был равен нулю (она называется основной или нулевой кривой намагничивания). Как видно из графика, при достаточно больших напряженностях магнитного поля ($H \geq H_s$) намагничивание достигает насыщения:

$$J = J_s$$

На рис. 3 приведена основная кривая в координатах В-Н (кривая 0-1).

При многократном изменении магнитного поля от значения H_m до $-H_m$ и опять до H_m магнитная индукция изменяется в соответствии с кривой 1-2-3-4-5-1, называемой петлей гистерезиса. Различным максимальным значениям напряженности H_m соответствуют разные петли гистерезиса (Рис.3). Геометрическим местом вершин таких петель гистерезиса при разных H_m является коммутационная кривая намагничения, близкая к основной кривой 0-1.

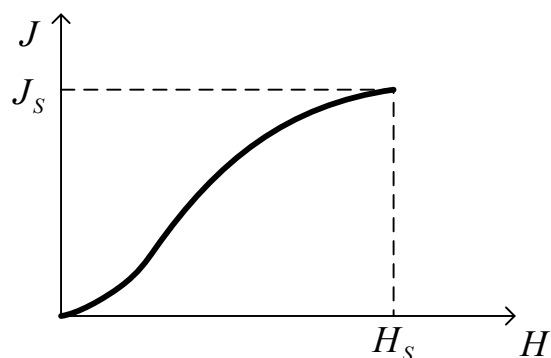


Рис. 2

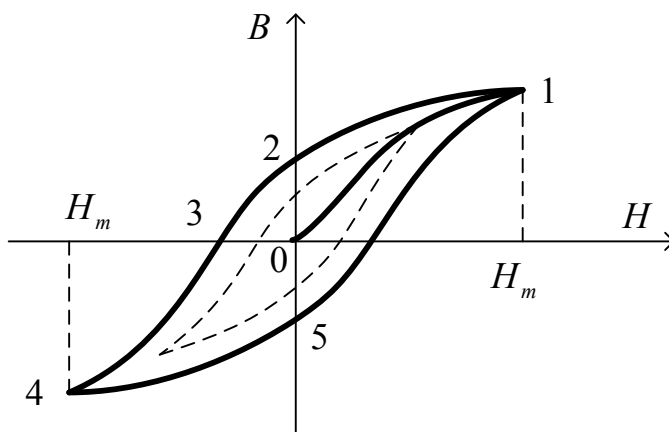


Рис. 3

Магнитная проницаемость μ также является функцией напряженности поля (Рис.4). С увеличением напряженности H намагничивающего поля μ сначала возрастает, а затем, достигнув максимума, уменьшается, асимптотически приближаясь к единице при неограниченном возрастании H .

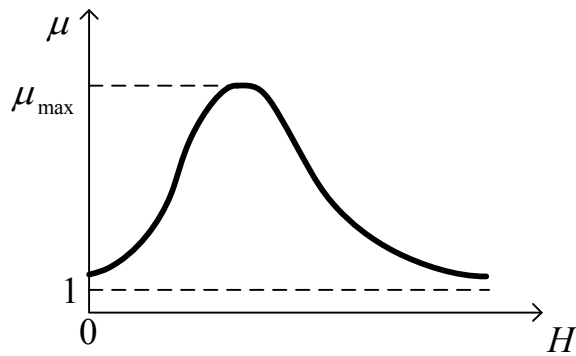


Рис.4

ЗАДАНИЕ: 1. Определить зависимость магнитной индукции B и магнитной проницаемости μ ферромагнитного образца от напряженности поля. 2. Построить график зависимости $B = f(H)$ и $\mu = f_1(H)$ и объяснить характер полученных кривых.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Железное кольцо с двумя обмотками, 2. Баллистический гальванометр, 3. Амперметр, 4. Двойной переключатель, 5. Ключи, 6. Источник постоянного напряжения, 7. Реостат.

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЙ

В работе используется разработанный Столетовым баллистический способ измерения магнитной индукции. Схема электрической цепи изображена на рис.5.

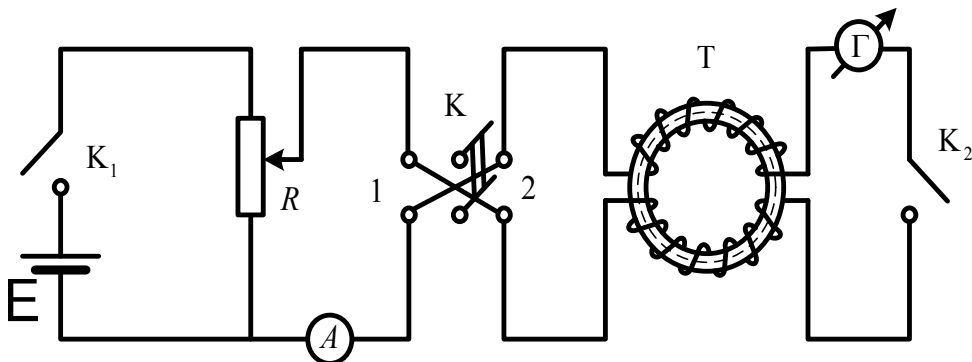


Рис. 5.

Исследуемый ферромагнитный образец выполнен в виде тонкого кольца (тора) T . На образце имеются две обмотки. Первичная обмотка (с числом витков N_1) равномерно намотана по всему кольцу, по ней идет ток i , который создает в тороиде магнитное поле с напряженностью

$$H = \frac{N_1 i}{\ell} \quad , \quad (5)$$

где ℓ - длина осевой линии тороида. Первичная обмотка присоединяется к источнику напряжения ξ с помощью переключателя (коммутатора) K , он служит для изменения направления тока, а следовательно, и напряженности магнитного поля.

Для определения магнитной индукции поля в тороиде служит вторичная обмотка, замкнутая на баллистический гальванометр Γ .

При коммутации тока в первичной обмотке изменяется полный магнитный поток Ψ , сцепленный со вторичной обмоткой, и во вторичной обмотке возникает ЭДС индукции

$$\xi_{\text{инд}} = - \frac{d\Psi}{dt} \quad . \quad (6)$$

ЭДС индукции создает во вторичной обмотке ток $i_{\text{инд}} = \frac{\xi_{\text{инд}}}{R}$,

где R - сопротивление вторичной обмотки. Отсюда заряд, протекающий через вторичную обмотку за время dt :

$$dQ = i dt \quad . \quad (7)$$

Проинтегрировав это выражение, найдем полный заряд, который протекает через баллистический гальванометр:

$$\int dQ = - \frac{1}{R} \int_1^2 d\Psi = \frac{1}{R} (\Psi_1 - \Psi_2) \quad , \quad (9)$$

где $\Psi_1 = N_2 BS$; $\Psi_2 = - N_2 BS$, N_2 – число витков во вторичной обмотке, S - площадь поперечного сечения тороида.

Окончательно,

$$Q = \frac{2N_2BS}{R} \quad (10)$$

При протекании заряда Q через баллистический гальванометр отклонение n светового зайчика на шкале пропорционально заряду

$$Q = kn \quad (11)$$

Из (10) и (11) получаем

$$B = \frac{kRn}{2N_2S} = Cn \quad (12)$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собирают схему согласно рис.5 и включают осветительную систему гальванометра. При сборке схемы следует учесть, что часть ее уже смонтирована. К началу опыта ключи K_1 и K_2 и коммутатор K должны быть разомкнуты.
2. Совмещают световой "зайчик" (его среднюю отсчетную линию) с нулевым делением шкалы гальванометра.
3. Замыкают ключ K_1 и коммутатор K и, пользуясь потенциометром R , устанавливают в первичной обмотке тороида силу тока 0,2 А.
4. Несколько раз путем быстрого перебрасывания рубильника коммутатора изменяют направление тока в первичной обмотке, чтобы создать устойчивую намагниченность сердечника. Коммутатор оставляют замкнутым в любом положении рубильника (например, в положении 1, см.схему рис.5)
5. Замыкают вторичную обмотку ключом K_2 .
6. Изменяют направление тока в первичной обмотке быстрым перебрасыванием рубильника K из положения 1 в положение 2 и одновременно замечают максимальное отклонение n "зайчика" на шкале в малых делениях шкалы.

7. Размыкают K_2 и снова повторяют действие, указанное в п.4, оставляя коммутатор в положении 2.
8. Замыкают K_2 , быстро перебрасывают рубильник K в прежнее положение I; опять замечают максимальное отклонение зайчика, но уже в другую сторону.
9. Вычисляют среднее значение абсолютных величин отклонения зайчика (в миллиметровых делениях шкалы).
10. Размыкают K_2 ; с помощью потенциометра R увеличивают силу тока в первичной обмотке на 0,1 А.
11. Повторяют все действия, указанные в пп.4,5,6,7,8,9 Измерение отброса "зайчика" гальванометра производят для нескольких токов, каждой раз увеличивая величину тока на 0,1 А до величины тока I А.
12. Полученные данные занести в таблицу 1.

Таблица 1

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
i, A	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
n_1, MM									
n_2, MM									
n_{cp}, MM									

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ

1. По формуле (5) рассчитывают напряженности полей H для всех токов.
2. По формуле (12) рассчитывают значения магнитной индукции B .

Параметры установки: $N_1 = 320$, $l = 0,35m$,

$C = 10^{-3}$ Тл/дел.

3. По результатам вычислений B и H рассчитывают μ по формуле (3).
4. Результаты определения B , H и μ заносят в таблицу 2.
5. Строят графики зависимости $B = f(H)$ и $\mu = f_1(H)$.

Для этого отводят одну страницу тетради в клетку. По оси абсцисс откладывают напряженность магнитного поля H в А/м. По оси ординат для

каждого значения H откладывают магнитную индукцию B в Тл и магнитную проницаемость μ . Все указанные величины откладывают по координатным осям в таком масштабе, чтобы график не вышел за пределы страницы.

6. Показать преподавателю полученные результаты.

Таблица 2

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$H, A/m$									
$B, Tл$									
μ									

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается явление электромагнитной индукции и где оно используется?
2. Вектор магнитной индукции, его определение и единицы измерения.
3. В чем заключается явление намагничивания вещества и как оно объясняется?
4. Что является основной характеристикой магнитного состояния вещества и от чего оно зависит?
5. Каков физический смысл вектора напряженности магнитного поля?
6. Дайте характеристику парамагнетиков, диамагнетиков и ферромагнетиков.
7. В чем заключается явление гистерезиса?
8. Расскажите о петле гистерезиса.
9. Что представляет собой коммутационная кривая намагничивания?
10. Расскажите о баллистическом методе определения магнитной индукции.
11. Выведите расчетную формулу для магнитной индукции.
12. Каково назначение первичной и вторичной обмоток тороида?

13. Почему при коммутировании тока в первичной обмотке ключ K_2 в цепи гальванометра должен быть разомкнут?

Литература

Савельев И. В. Курс общей физики. Т.2 : Электричество и магнетизм. Волны. Оптика / И. В. Савельев. - Изд. 10-е, СПб. : Лань, 2008. - 496 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЛЬВАНОМЕТРА МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Лабораторная работа №29

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: Экспериментальное измерение основных характеристик гальванометра магнитоэлектрической системы.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В электроизмерительных приборах магнитоэлектрической системы используется взаимодействие поля постоянного магнита и проводника с током для измерения силы тока. Отметим, что на практике часто используются электроизмерительные приборы и других типов: электромагнитного типа (в которых части из железа втягиваются в катушку с током) и электродинамического типа (в которых взаимодействуют две катушки с током).

§ 1. Приборы магнитоэлектрической системы

Принцип работы измерительных приборов магнитоэлектрической системы основан на следующих явлениях:

На рамку с током, помещенную в однородное магнитное поле, как известно, действует вращающий момент сил

$$M_{\text{вр}} = iSB\sin\alpha, \quad (1)$$

который приведет к повороту рамки вокруг ее оси и вызовет растяжение упругой пружины, прикрепленной к рамке. Возникающий при деформации пружины механический момент сил $M_{\text{упр}}$, уравновесит действующий момент $M_{\text{вр}}$, т. е.

$$M_{\text{вр}} = M_{\text{упр}} \quad (2)$$

Значение угла поворота рамки, при котором выполняется условие равновесия (2), можно измерить и определить силу тока в рамке (см. рис.1).

Отметим, что при повороте рамки изменится значение угла α и, следовательно, изменится значение вращающего момента $M_{вр}$ (1). Это обстоятельство затрудняет использование поворота рамки в однородном поле для измерительных приборов. На практике широко используется поворот рамки в неоднородном магнитном поле.

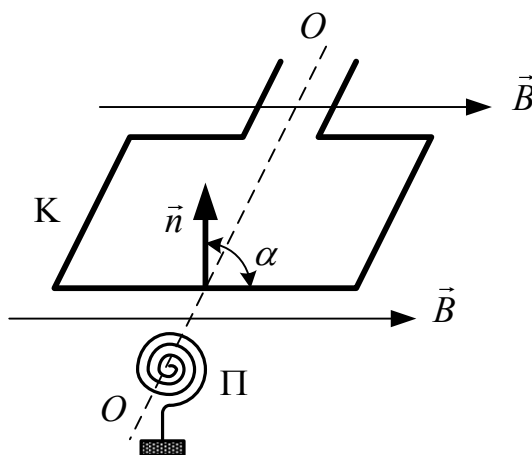


Рис.1

Здесь: К – рамка, П – пружина, ОО – ось вращения рамки, i – ток в рамке, S – площадь рамки, α – угол между нормалью к плоскости рамки и вектором магнитной индукции \vec{B} поля постоянного магнита (на рис.1 показано положение рамки в момент, когда $\alpha = 90^\circ$).

Наиболее удачной является конструкция гальванометра с радиальным магнитным полем: такое поле создано в узком зазоре между цилиндрическими полюсными наконечниками N и S постоянного магнита и железным сердечником Ц цилиндрической формы. Оси сердечника и полюсных наконечников совпадают с осью вращения рамки ОО. В таком цилиндрическом зазоре вектор магнитной индукции \vec{B} направлен по радиусу и совпадает с плоскостью рамки. Поэтому угол $\alpha = 90^\circ$ и вращающий момент $M_{вр}$

$$M_{вр} = iBS = const \quad (3)$$

При повороте рамки на угол φ возникает момент упругих сил $M_{\text{упр}}$ деформированной пружины, который, согласно закону упругих деформаций – **закону Гука**, пропорционален углу поворота рамки, т. е.

$$M_{\text{упр}} = k_1 \cdot \varphi \quad (4)$$

где k_1 – коэффициент упругости пружины.

Согласно (2), (3), (4) имеем:

$$M_{\text{вр}} = M_{\text{упр}} \quad iBS = k_1 \cdot \varphi \quad (5)$$

$$i = C' \cdot \varphi \quad C' = k_1/S \cdot B$$

Таким образом, рассматриваемый гальванометр имеет линейную шкалу: измеряемый ток i пропорционален углу поворота рамки φ : $i = C' \cdot \varphi$.

Для измерения угла φ в приборах используется шкала, расположенная по окружности радиуса R (радиус R приблизительно равен длине стрелки), центр которой совпадает с осью O вращения рамки. Стрелка направлена по нормали к рамке (рис.1). Величина угла поворота φ и соответствующее число делений n шкалы связаны соотношением $\varphi = k_2 \frac{n}{R}$, где k_2 – коэффициент пропорциональности, зависящий от масштаба шкалы. Поэтому величину измеряемого тока i можно выразить, согласно (5), в делениях шкалы n :

$$i = C' \cdot \varphi = C' \cdot k_2 \frac{n}{R} = C_1 i = C' \cdot n \quad (6)$$

$$C_1 = C' \cdot \frac{k_2}{R} = \frac{k_1 \cdot k_2}{S \cdot B \cdot R} = \frac{i}{n}$$

Коэффициент пропорциональности C_1 (6), зависящий от параметров прибора, называется ценой деления шкалы гальванометра или постоянной прибора. Согласно (6) цена деления прибора $C_1 = i/n$ равна величине тока, вызывающего отклонение стрелки гальванометра на одно деление. Величину, обратную цене деления

$$S_1 = \frac{1}{C_1} = \frac{n}{i} \quad (7)$$

называют чувствительностью гальванометра.

Обычно цена деления шкалы стрелочного гальванометра имеет величину порядка $C_1 = (10^{-6} \div 10^{-7})$ А/дел, соответственно $S_1 = (10^6 \div 10^7)$ дел/А. Это означает, что гальванометр, имеющий, например, шкалу с делениями $n_{\max}=50$, может измерять максимальную величину тока $i_g = C_1 \cdot n_{\max}$ (6), когда стрелка отклоняется на всю шкалу прибора, равную $i_g = 10^{-6} \cdot 50 \text{ А} = 50 \text{ мкА}$ ($1 \text{ мкА} = 10^{-6} \text{ А}$). Именно поэтому гальванометром называется высокочувствительный прибор, предназначенный для измерения слабых токов.

Для увеличения чувствительности гальванометра облегчают его подвижную часть, делают рамку-катушку из очень тонкой проволоки (диаметр порядка $10 \text{ мкм} = 10^{-2} \text{ мм} = 10^{-5} \text{ м}$).

Приборы магнитоэлектрической системы пригодны лишь для измерения постоянных токов. Действительно, при прохождении переменного тока вращающий момент $M_{вр} = iSB$ (3) изменяет свой знак, т.е. $M_{вр}$ будет вызывать лишь колебания рамки около нулевого положения. В связи с этим в измерительной технике применяются другие системы приборов (например, электромагнитная, электродинамическая), предназначенных для измерений как постоянных, так и переменных токов. Отметим, что приборы магнитоэлектрической системы можно использовать и для измерения переменных токов, если в измерительную цепь поставить выпрямляющее устройство (например, полупроводниковый диод).

§ 2. Измерение силы тока и разности потенциалов.

Добавочные сопротивления и шунты.

Гальванометры предназначены для измерения слабых токов. Подвижная рамка прибора (легкая катушка) наматывается из тонкой проволоки. Проволока имеет определенное значение сопротивления R_g , которое называется внутренним сопротивлением гальванометра, и может выдержать предельно допустимый ток i_g . Значение максимальной силы тока i_g можно оценить с помощью соотношения (6), (7).

$$i_g = \frac{N}{S_1} = C_1 \cdot N \quad (8)$$

где N – полное число делений шкалы прибора, $S_1 = \frac{1}{c_1}$ – чувствительность гальванометра.

При увеличении силы тока в рамке $i > i_g$ стрелка прибора отклонится на всю шкалу, достигнет ограничителя и может изогнуться (прибор «зашкало»). При дальнейшем увеличении силы тока $i > i_g$ может перегореть и проволока в рамке. Поэтому при $i > i_g$ прибор может выйти из строя.

Отметим, что произведение максимального тока i_g и внутреннего сопротивления R_g определяет величину $U_g = i_g \cdot R_g$ максимальной разности потенциалов, которую можно подавать на гальванометр. Если подаваемая разность потенциалов U больше, т.е. $U > U_g$, то прибор может выйти из строя.

Для расширения пределов измерений силы тока и разности потенциалов, проводимых с помощью такого гальванометра, используют добавочные сопротивления и шунты, подсоединяемые к рамке гальванометра. В результате один и тот же гальванометр может быть использован либо в качестве амперметра, либо в качестве вольтметра.

Рассмотрим работу амперметра. Нам необходимо измерить силу тока i в некоторой цепи. Из предварительных оценок известно, что $i > i_g$ для имеющегося в нашем распоряжении гальванометра. Прямое подключение гальванометра в такую цепь невозможно – прибор выйдет из строя. Следовательно, часть тока i в цепи необходимо провести мимо гальванометра с внутренним сопротивлением R_g . Это возможно, если параллельно гальванометру подключить сопротивление $R_{ш}$, которое называется шунтом. Шунт $R_{ш}$ подбирают так, чтобы ток через гальванометр не превышал i_g (см. рис.2). Измеряемый ток i в узле **а)** разделяется на сумму токов, проходящих через гальванометр i_g и шунт $i_{ш}$, т.е. $i = i_g + i_{ш}$. Сопротивления R_g и $R_{ш}$ включены параллельно и падение напряжения на них одинаково, т.е. $i_{ш} \cdot R_{ш} = i_g \cdot R_g$. Из этих двух уравнений следует,

$$i_g = i \frac{R_{ш}}{R_g + R_{ш}} \quad (9)$$

При измерении сильных токов $i \gg i_g$ выбирают малое сопротивление шунта $R_{ш} \ll R_g$, так чтобы через гальванометр проходила меньшая часть измеряемого тока i , т.е. $i_g \approx i \frac{R_{ш}}{R_g} \ll i$ и прибор не вышел из строя. Согласно (9), ток в гальванометре пропорционален измеряемому току $i_g \sim i$ и, следовательно, шкалу гальванометра можно отградуировать непосредственно в амперах. Такой прибор и называется амперметром, он состоит из гальванометра Γ и сопротивления шунта $R_{ш}$ (обведен пунктиром на рис.2 а). Амперметр включается в сеть последовательно. Благодаря малому сопротивлению шунта $R_{ш} \ll R_g$ общее сопротивление амперметра

$$r_a = i \frac{R_g \cdot R_{ш}}{R_g + R_{ш}} \approx R_{ш}$$

мало, в результате чего включение амперметра в цепь почти не изменяет в ней силы тока.

На практике часто используют многошкальные приборы с набором шунтов (каждый шунт соответствует определенной шкале прибора), которые можно переключать в зависимости от величины измеряемых токов и изменять чувствительность прибора $S_1 = \frac{n}{i_g}$ (7)

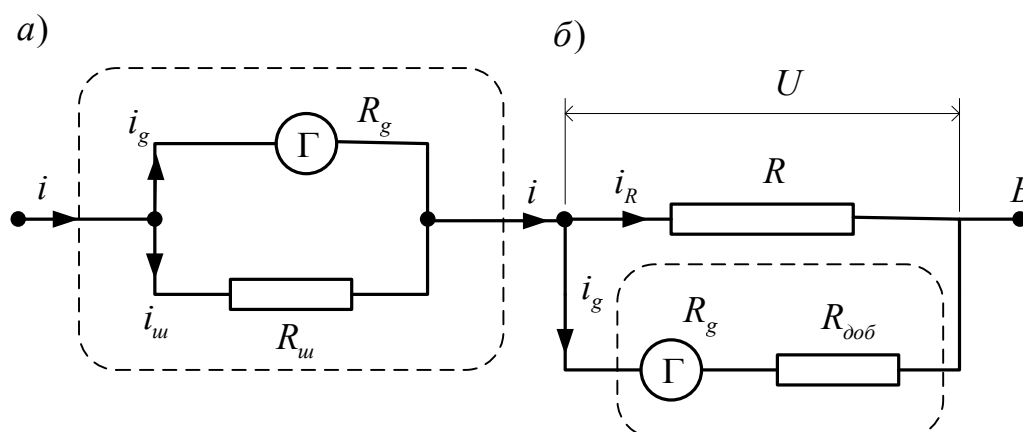


Рис.2 Схема подключения добавочных сопротивлений к гальванометру и включение амперметра (а) и вольтметра (б) в цепь.

Рассмотрим работу вольтметра. Предположим, что необходимо измерить разность потенциалов U на концах сопротивления R (см. рис.2 б). Из предварительных оценок известно, что $U > U_g = i_g \cdot R_g$, т.е. разность потенциалов U больше, чем максимальная разность потенциалов $U_g = i_g \cdot R_g$ имеющегося в нашем распоряжении гальванометра G . Прямое подключение гальванометра в такую цепь невозможно – прибор выйдет из строя. Тогда к гальванометру с внутренним сопротивлением R_g подбирают и последовательно с ним включают добавочное сопротивление $R_{доб}$ так, чтобы ток в измерительной цепи из двух сопротивлений R_g и $R_{доб}$ не превышал максимального допустимого тока гальванометра i_g , т.е. $U = i_g \cdot (R_g + R_{доб})$. Отметим, что при этом ток в измерительной цепи и ток через гальванометр

$$i_g = U \frac{1}{R_g + R_{доб}} \quad (10)$$

пропорциональны измеряемой разности потенциалов U , т.е. $i_g \sim U$. Поэтому шкалу такого гальванометра можно отградуировать непосредственно в вольтах. Такой прибор и называется вольтметром (обведен пунктиром на рис.2б). Общее сопротивление вольтметра $r_v = R_g + R_{доб}$ должно быть много больше сопротивления в цепи R ($r_v \gg R$). Это необходимо для того, чтобы подключение вольтметра не искажало существенно распределение потенциала в цепи.

Отметим, что вольтметр показывает падение напряжения на собственном сопротивлении $r_v = R_g + R_{доб}$. На практике часто используют многошкальные вольтметры с набором дополнительных сопротивлений $R_{доб}$.

§ 3. Экспериментальная часть. Описание лабораторной установки.

В этой части работы производится измерение чувствительности и внутреннего сопротивления гальванометра магнитоэлектрической системы.

Для производства измерений необходимы следующие приборы и принадлежности:

1. Исследуемый гальванометр.

2. Милливольтметр постоянного тока на 100-150 мВ
3. Магазин сопротивлений на 40000 ом.
4. Высокоомный реостат (в качестве потенциометра)
5. Три однополюсных ключа. Соединительные провода.
6. Источник тока.

Схема экспериментальной установки для измерения чувствительности S_1 и внутреннего сопротивления R_g приведена на рис.3

Для определения значения силы тока i_g , проходящего через гальванометр, и внутреннего сопротивления R_g проведем следующий опыт. Установим определенное значение сопротивления R_M и подведем потенциометром R такое напряжение U_1 (измеряется милливольтметром mV), чтобы стрелка гальванометра Γ отклонилась на n делений (например $n = 30$). Согласно закону Ома, ток i_g будет определяться соотношением

$$i_{g1} = \frac{U_1}{R_g + R_{M1}} \quad (11)$$

где i_{g1} и R_g - неизвестные величины. Затем установим другое значение сопротивления R_{M2} и подведем такое напряжение U_2 , чтобы стрелка вновь отклонилась на те же n делений ($n = 30$). Тогда ток через гальванометр

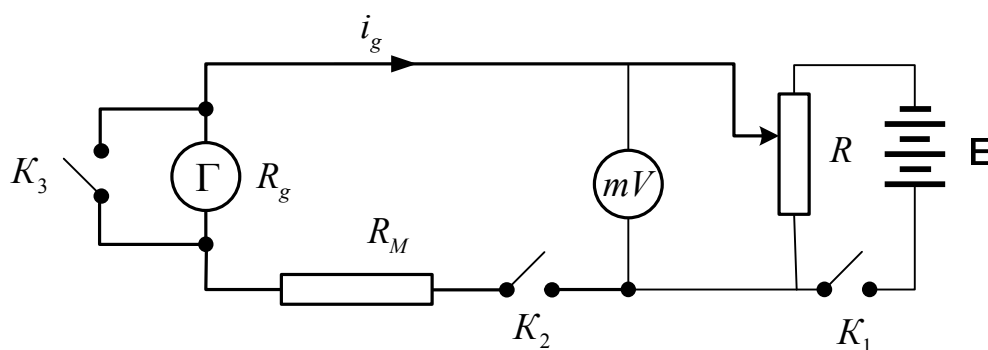


Рис.3 Схема экспериментальной установки

Γ - гальванометр с неизвестным сопротивлением R_g ; R_M - магазин сопротивлений; R - потенциометр (делитель напряжения); E - эдс источника тока; K_1 , K_2 , K_3 – однополюсные ключи.

$$i_{g2} = \frac{U_2}{R_g + R_{M2}} \quad (12)$$

будет равен значению тока, полученному в первом измерении, т.е. $i_{g1} = i_{g2} = i_g$. Решая два уравнения (11) и (12) относительно двух неизвестных i_g и R_g , получим

$$i_g = \frac{U_1 - U_2}{R_{M1} - R_{M2}} \quad (13)$$

$$R_g = \frac{U_2 \cdot R_{M1} - U_1 \cdot R_{M2}}{U_1 - U_2} \quad (14)$$

Отсюда, учитывая определение чувствительности гальванометра S_1 (7), получим

$$S_1 = \frac{n}{i_g} = n \frac{R_{M1} - R_{M2}}{U_1 - U_2} \quad (15)$$

Соотношения (14), (15) являются рабочими, они используются в настоящей работе для определения внутреннего сопротивления R_g и чувствительности гальванометра S_1 .

§4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.

I. Подготовьте таблицу данных опыта.

№№ пп	R_{M1} (Ом)	U_1 (В)	R_{M2} (Ом)	U_2 (В)	n (дел)	S_1 дел/а	R_g (Ом)	S_{cp} Дел/а	$(R_g)_{cp}$ (Ом)
1									
2									
3									

K_1 и K_2 должны быть в разомкнутом, K_3 – в замкнутом состоянии.

Движок потенциометра R поставьте в положение, соответствующее нулевому напряжению на милливольтметре.

2. С помощью магазина сопротивлений установите значение сопротивление R_{M1} порядка **500-2500 Ом**.

3. Замкните ключи K_1 и K_2 и разомкните ключ K_3 . Перемещая движок потенциометра R , установите стрелку гальванометра на $n=30$ делений (можно выбрать другое число делений, но не больше **30**).

Снимите показания милливольтметра U_1 (в вольтметрах) и все данные (R_{M1} , U_1 , n), опыты запишите в таблицу.

4. Установите другое значение сопротивления R_{M2} порядка **500-3000 Ом**.

Потенциометром R установите такое значение напряжения U_2 , чтобы стрелка вновь встала на $n=30$ делений. Данные опыта (R_{M2} , U_2 , n) запишите в таблицу.

5. Используя соотношения (17), (18), вычислите внутреннее сопротивление R_g и чувствительность S_I гальванометра. Результаты вычислений запишите в таблицу.

6. Опыты и расчёты в соответствии с пунктами 2-5 проделайте три раза различных значениях R_{M1} и R_{M2} , выбрав новое значение отклонений стрелки гальванометра и в пределах $n=10+30$ делений. Из всех найденных значений R_g и S_I определите их среднее арифметическое значение.

Результаты расчётов запишите в таблицу данных и покажите заполненную таблицу преподавателю.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Определите цену одного деления гальванометра.
2. Какой предельный ток I_g можно измерить этим гальванометром?
3. Определите внутреннее сопротивление гальванометра, рассчитайте значение сопротивления шунта $R_{ш}$ при котором гальванометр может быть использован в качестве амперметра для измерения силы тока до 10 ампер.
4. Рассчитайте значение дополнительного сопротивления $R_{доб}$, при котором гальванометр может быть использован в качестве вольтметра для измерения напряжения до 100 вольт.

5. Какую роль играет ключ K_3 в схеме?
6. Объясните принцип работы электроизмерительных приборов магнито-электрической системы.

ИЗМЕРЕНИЕ ПОТЕРЬ НАПРЯЖЕНИЯ В ПРОВОДАХ

Лабораторная работа № 30

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: ознакомление с общими принципами передачи электрической энергии на большие расстояния и определение потерь напряжения в моделях электрических линий.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Передача электрической энергии от генератора к приемникам обычно происходит по проводам, которые образуют электрическую цепь. В простейшем случае, рассматриваемом в настоящей работе, провода и приемники образуют цепь неразветвленную (см.рис.1), поскольку энергия передается по двум проводам.

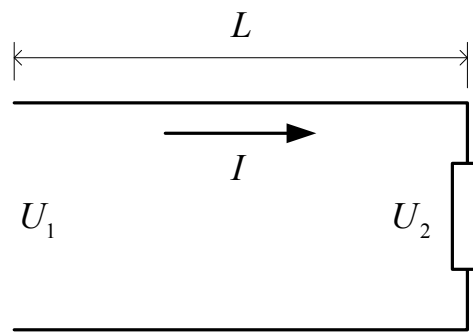


Рис.1

Сопротивление r_1 каждого такого провода длиной l , определяется известной формулой

$$r_1 = \rho \frac{l}{S}$$

Где ρ - удельное сопротивление проводника, S – площадь его поперечного сечения. Поскольку проводов два, то очевидно, что общее сопротивление линии будет определяться следующим образом

$$r = 2r_1 = 2\rho \frac{l}{S}$$

При передаче энергии, в результате падения напряжения в проводах (на сопротивлении r), напряжение в конце линии U_2 (т.е. на зажимах генера-

тора). Разность напряжений U_1 и U_2 принято называть потерей напряжения и обозначать символом ΔU :

$$\Delta U = U_1 - U_2 \quad (1)$$

По закону Ома для участка цепи, эта величина равна

$$\Delta U = Ir = 2I\rho \frac{l}{S} \quad (2)$$

Известно, что участок сети обычно состоит из нескольких приемников электроэнергии. В связи с этим, рассмотрим следующий пример. Допустим, что имеется три приемника с токами, соответственно, I_1, I_2, I_3 , подключенных в различных местах линии (рис.2).

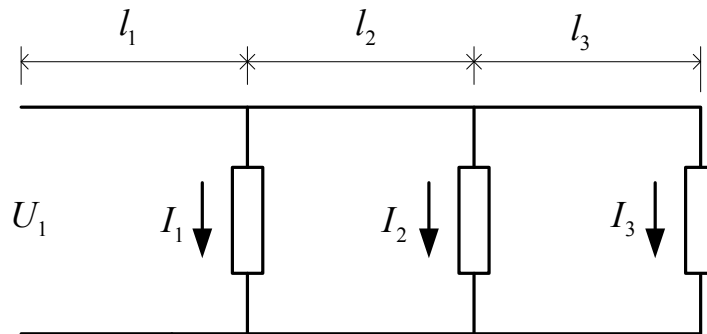


Рис.2

В этом случае, потери напряжения могут быть вычислены по формуле

$$\Delta U = 2\rho(I_1L_1 + I_2L_2 + I_3L_3)/S \quad (3)$$

где $L_1 = l_1$, $L_2 = l_1 + l_2$, $L_3 = l_1 + l_2 + l_3$.

С целью экономии энергии, потеря напряжения ΔU обычно допускается незначительной по сравнению с U_1 .

Ток потребителя (его еще принято называть «нагрузка») при различных сопротивлениях приемника изменяется от нуля до некоторого максимального значения. При этом потеря напряжения в сети также меняется от нуля до своего максимума. При постоянном напряжении U_1 в начале сети, напряжение в конце сети изменяется от $U_2=U_1$ (тогда $\Delta U=0$) при $I = 0$ до $U'_2 = U_1 - \Delta U$. В связи с этим, допустимая потеря напряжения в сети считается равной допускаемому изменению напряжения на зажимах приемника $U_2 - U'_2 = U_1 - U'_2 = \Delta U$

Так, например, для электрических ламп считается допустимым изменением напряжения на $(1 \div 2)\%$, для электродвигателей – на $(2 \div 5)\%$ от номинального значения напряжения (т.е. величины U_1).

В качестве величины характеризующей эффективность передачи энергии, используется коэффициент полезного действия (к.п.д.) электрической сети, который определяется следующим образом:

$$\eta = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} \quad (4)$$

Физические величины P_1 и ΔP входящие в выражение (4), представляют собой, соответственно мощность на входе линии и мощность потерь.

Последняя может быть определена формулой

$$\Delta P = I \Delta U = I^2 r = 2I^2 \rho \frac{l}{S} \quad (5)$$

Мощность потерь показывает ту долю начальной энергии, которая теряется в проводах (расходуется на нагрев) при ее передаче. Учитывая определение для мощности тока и уравнения (5), для к.п.д. может быть записана следующая цепочка равенств:

$$\eta = \frac{U_1 I - \Delta U I}{U_1 I} = \frac{U_1 - \Delta U}{U_1} = \frac{U_2}{U_1} \quad (6)$$

Обычно передача энергии осуществляется при к.п.д. равном $0,98 \div 0,95$. В этом случае напряжение на зажимах потребителя отличается от напряжения в начале сети на $(2 \div 5)\%$.

СХЕМА УСТАНОВКИ И МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ

В соответствии с уравнением (2), одинакового изменения потерь напряжения можно добиться либо за счет изменения длины проводов l , либо удельного сопротивления ρ . Именно это обстоятельство используется в настоящей работе для моделирования процесса передачи электрической энергии на большие расстояния.

Основной частью лабораторной установки являются три пары проводов прикрепленных к клеммам расположенным на специальных стойках (см. рис.3). Провода имеют одинаковую длину, но выполнены из метал-

лов имеющих разное удельное сопротивление. Увеличение последнего эквивалентно увеличению расстояния от источника до потребителя электрической энергии. Представленная схема позволяет подавать от источника питания (ИП) напряжение U_1 на вход любой из линий (№ 1, 2 или 3) с помощью соответствующих переключений коммутатора К. При этом, измерение входного напряжения осуществляется с помощью вольтметра V_1 , а выходного с помощью V_2 .

Моделирование различных нагрузок потребителя осуществляется реостатом R , а измерение тока (нагрузки) – амперметром A , включенным последовательно с реостатом.

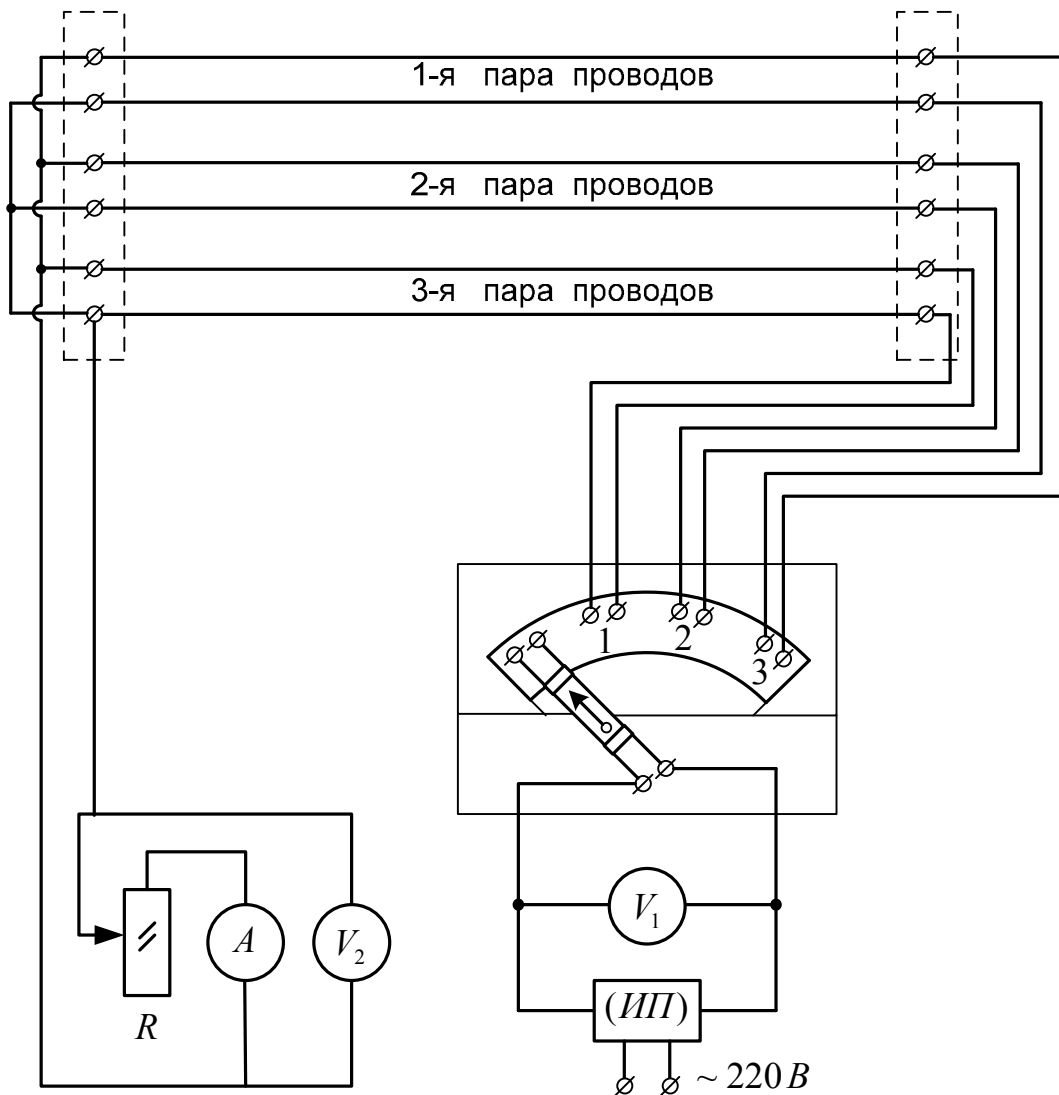


Рис. 3

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Предварительно следует отметить, что одним из разновидностей систематических ошибок, которые обязательно присутствуют в каждом эксперименте, представляют собой ошибки измерительных приборов. При измерении электрических величин (например, силы тока, напряжения и т.д.), величина этой ошибки определяется классом точности используемого прибора. Для таких приборов как вольтметры и амперметры, последний указывается числом обведенным в кружок (например, 0,5; 1,0; 2,5 и т. д.), что означает максимальную абсолютную погрешность данного прибора, выраженную в процентах от максимального значения шкалы. Например, для вольтметра рассчитанного на напряжение 150В и имеющего класс точности 1,0, максимальная ошибка в любой точке шкалы составляет $\pm 1,5$ В, т. е. 1% от 150В. Если вольтметр показывает 120В, то результат может быть представлен следующим образом: $U=(120\pm 1.5)$ В. Данная запись означает, что истинное значение напряжения лежит где-то в интервале от 118,5 В до 121,5 В. При этом сказать о значении напряжения что либо более определенное не представляется возможным.

Итак, для выполнения задания, представленного в настоящей работе следует:

1. Записать основные технические данные используемых приборов (класс точности и пределы измерения).
2. Включить источник питания и подключиться с помощью коммутатора к одной из трех линий.
3. Изменяя сопротивление реостата при 4-7 положениях его подвижного контакта, снять соответствующие показания амперметра и вольтметров.

4. Вычислить с помощью формулы (1) величину потерь $\Delta U'$, а с помощью формулы (2) величину $\Delta U''$. Для каждого из этих величин найти погрешность ее определения.
5. Для всех случаев, с помощью формул (5) и (6), определить мощность потерь и коэффициент полезного действия. Полученные результаты занести в таблицу.

Таблица 1

№ опыта	$\rho, \text{Ом}\cdot\text{м}$	$I, \text{А}$	$U_1, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$\Delta U', \text{В}$	$\Delta U'', \text{В}$	$\Delta P, \text{Вт}$	η
1	2	3	4	5	6	7	8	9

6. В том же порядке провести измерения для других линий.
7. В одной системе координат, построить графики, демонстрирующие зависимости к.п.д. от величины нагрузки для каждой из рассматриваемых линий.
8. По результатам проделанной работы сделать следующие выводы:
 - а) Какой из способов определения потерь напряжения (т.е. величин $\Delta U'$ и $\Delta U''$) является более точным?
 - б) Какой характер имеет зависимость к.п.д. от величины нагрузки линии и как его величина зависит от материала проводов при одинаковой величине нагрузки.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется потерями напряжения в проводах и от чего зависит их величина?
2. При какой длине линии выполненной медными проводами, величина потерь будет иметь такую же величину что и для данной линии из нихрома?
3. Что называется нагрузкой линии, и какие факторы влияют на ее величину?

4. Получить формулу (3).
5. Всякая электрическая сеть состоит из генератора с внутренним сопротивлением r и внешнего сопротивления R . При каком соотношении между этими сопротивлениями полезная мощность максимальна? Чему равен при этом к.п.д.? К чему стремится величина к.п.д. при увеличении сопротивления R ?
6. Помещение освещается группой ламп общей мощностью 2 кВт. При этом, напряжение на зажимах генератора составляет 250 В, а расстояние от генератора до помещения 100 м. Найти сечение медных проводов, при котором напряжение на лампах будет не менее 220 В. Чему равна сила тока в подводящих проводах?
7. Определить, какую наибольшую мощность можно передать потребителю по двухпроводной линии на расстояние 1,5 км. Линия сделана из медного провода сечением 18 мм^2 . Напряжение на клеммах генератора 230 В, а потери напряжения на линии не превышают 10%.

Литература

- [1] Савельев И. В. Курс общей физики, ч.2, М.: Наука, 1987, 432 с.
- [2] Зисман Г. А., Тодес О. М. Курс общей физики, ч.2, М.: Наука, 1972, 352 с.
- [3] Яворский Б. М., Селезнев Ю. А. Справочное руководство по физике, М.: Наука, 1989, 576 с.
- [4] Волькенштейн В. С. Сборник задач по общему курсу физики, М.: Наука, 1990, 397 с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ РЕЗИСТИВНОГО ПРОВОДА

Лабораторная работа № 57

Целью настоящей работы является измерение сопротивления техническим методом и определение удельного сопротивления резистивного провода.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Электрическим током называется любое упорядоченное (направленное) движение электрических зарядов. Для возникновения и существования электрического тока необходимо, с одной стороны, наличие свободных носителей тока – заряженных частиц, способных перемещаться упорядоченно, а с другой – наличие электрического поля, энергия которого, каким-то образом восполняясь, расходовалась бы на их упорядоченное движение. За направление тока условно принимают направление движения положительных зарядов.

Количественной мерой электрического тока служит сила тока I – скалярная физическая величина, определяемая электрическим зарядом, проходящим через поперечное сечение проводника в единицу времени:

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (1)$$

Ток, сила и направление которого не изменяются со временем, называют постоянным. Для постоянного тока

$$I = \frac{q}{t} \quad (2)$$

где q – электрический заряд, проходящий за время t через поперечное сечение проводника. Единица силы тока – ампер (A).

Физическая величина, определяемая силой тока, проходящего через единицу площади поперечного сечения проводника, перпендикулярного направлению тока, называется плотностью тока:

$$j = \frac{I}{S} \quad (3)$$

Плотность тока \vec{j} – вектор, ориентированный по направлению тока, т.е. направление вектора совпадает с направлением упорядоченного движения положительных зарядов. Единица плотности тока – ампер на метр в квадрате $\left(\frac{A}{m^2}\right)$.

Немецкий физик Г. Ом экспериментально установил, что сила тока I , текущего по однородному металлическому проводнику (т.е. проводнику в котором не действуют сторонние силы), пропорциональна напряжению U на концах проводника и обратно пропорциональна сопротивлению проводника:

$$I = \frac{U}{R} \quad (4)$$

где R – электрическое сопротивление проводника. Формула (4) позволяет установить единицу сопротивления – Ом: 1 Ом – сопротивление такого проводника, в котором при напряжении 1 В течет постоянный ток силой 1 А.

Сопротивление проводника зависит от его размеров и формы, а также от материала, из которого проводник изготовлен. Для цилиндрического проводника сопротивление R прямо пропорционально его длине l и обратно пропорционально площади его поперечного сечения S :

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (5)$$

где ρ – коэффициент пропорциональности, характеризующий материал проводника. Он называется удельным электрическим сопротивлением. Единица удельного электрического сопротивления – *ом · метр* ($Ом \cdot м$). Наименьшим удельным сопротивлением обладают серебро ($1,6 \cdot 10^{-8} Ом \cdot м$) и медь ($1,7 \cdot 10^{-8} Ом \cdot м$). На практике наряду с медными применяются алюминиевые провода, хотя алюминий и имеет большее, чем медь, удельное сопротивление ($2,6 \cdot 10^{-8} Ом \cdot м$), но зато обладает меньшей плотностью, по сравнению с медью.

Закон Ома можно представить в дифференциальной форме. Подставив выражения для сопротивления (5) в закон Ома (4), получим

$$\frac{I}{S} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{U}{l} \quad (6)$$

Величина

$$\gamma = \frac{1}{\rho}$$

обратная удельному сопротивлению, называется удельной проводимостью

вещества проводника. Ее единица – сименс на метр $\left(\frac{См}{м}\right)$. Учитывая, что

$U/l = E$ – напряженность электрического поля в проводнике, $I/S = j$ – плотность тока, формулу (6) можно записать в виде

$$j = \gamma E \quad (7)$$

Так как носители заряда в каждой точке движутся в направлении вектора \vec{E} , то направление \vec{j} и \vec{E} совпадают. Поэтому формулу (7) можно записать в виде – закон Ома в дифференциальной форме:

$$\vec{j} = \gamma \vec{E} \quad (8)$$

При последовательном соединении проводников их сопротивления складываются:

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

а при параллельном – суммируются обратные значения сопротивлений:

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

ОПИСАНИЕ ПРИБОРА И МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ

В работе определяется удельное сопротивление резистивного провода путем измерения активного сопротивления его техническим методом. Установка для измерения изображена на рис. 1. На рисунке выноски обозначают:

- 1 – резистивный провод
- 2 – метрическая шкала
- 3 – подвижный кронштейн
- 4 – измерительная часть прибора
- 5, 6 – вольтметр и амперметр
- 7 – регулятор тока
- 8 – переключатель вида работ

9 – переключатель для включения соответствующей схемы при измерении

техническим методом

10 – выключатель питания

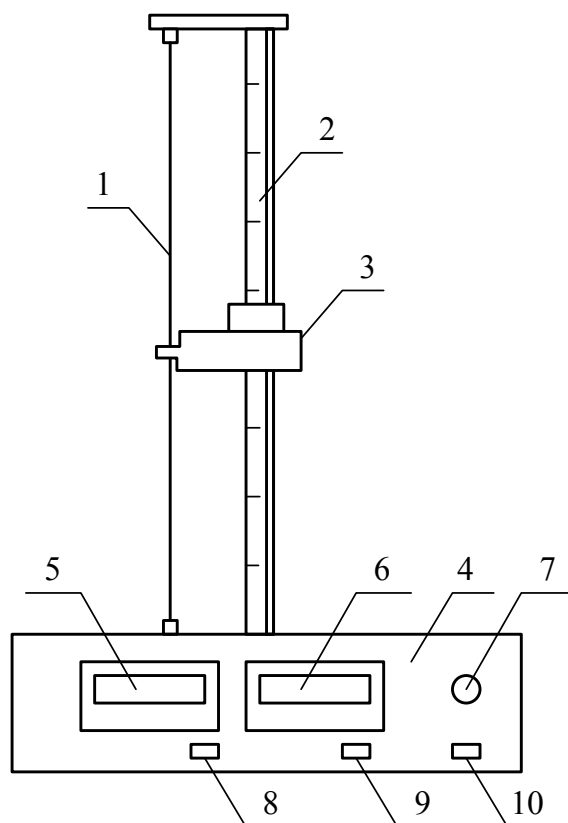


Рис. 1

ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ МЕТОДОМ С ТОЧНЫМ ИЗМЕРЕНИЕМ СИЛЫ ТОКА

При подключении миллиамперметра и вольтметра по схеме рис. 2 миллиамперметр показывает силу тока, текущего через измеряемое сопротивление отрезка провода ВС. По закону Ома для участка цепи ABC

$$I_A = \frac{U_V}{R} \quad (9)$$

где I_A – показание миллиамперметра (сила тока на участке ABC), U_V – показание вольтметра (напряжение на участке ABC), R – сопротивление участка ABC. Сопротивление R складывается из сопротивления амперметра R_A и сопротивления провода R_{np} :

$$R = R_A + R_{np} \quad (10)$$

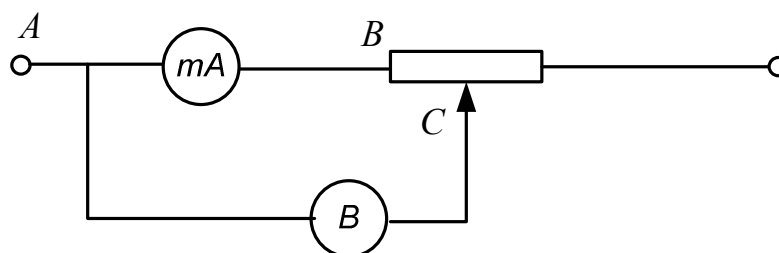


Рис. 2.

Из (9) и (10) получаем

$$R_{np} = \frac{U_V}{I_A} - R_A \quad (11)$$

ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ МЕТОДОМ С ТОЧНЫМ ИЗМЕРЕНИЕМ НАПРЯЖЕНИЯ

Для измерения этим способом приборы подключаются по схеме рис. 3.

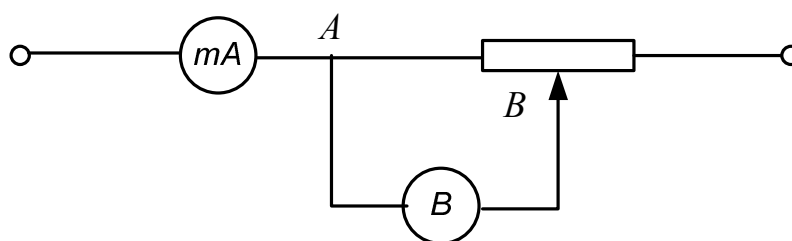


Рис. 3

В этом случае для участка АВ, представляющего параллельное соединение сопротивлений отрезка провода R_{np} и сопротивления вольтметра R_V , имеем:

$$\frac{I_{np}}{I_V} = \frac{R_V}{R_{np}} \quad (12)$$

$$I_A = I_{np} + I_V \quad (13)$$

где I_V, I_{np} – токи, текущие через вольтметр и провод, I_A – показание миллиамперметра. Из (12) и (13) находим сопротивление провода

$$R_{np} = \frac{I_V \cdot R_V}{I_A - I_V} \quad (14)$$

По закону Ома для вольтметра

$$I_V = \frac{U_V}{R_V} \quad (15)$$

2. Передвинуть подвижный контейнер 3 примерно на 0,7 длины провода по отношению к основанию. Определить длину l_{np} отрезка провода от основания до подвижного кронштейна по шкале 2.
3. Нажатием клавиши 10 включить напряжение питания.
4. При измерении техническим методом клавиша 8 должна быть в нажатом положении.
5. Для выполнения задания 1 (с точным измерением тока) поставить клавишу 9 в отжатое положение.
6. При помощи регулятора тока 7 установить такое значение тока, чтобы вольтметр показал $2/3$ измеряемого диапазона.
7. Снять показания миллиамперметра и вольтметра для трех различных значений токов и занести в таблицу.
8. Используя формулы (11) и (20), вычислить сопротивление R_{np} и удельное сопротивление ρ для каждого измерения, найти ρ_{cp} .
9. При выполнении задания 2 (с точным измерением напряжения) привести клавишу 9 в нажатое состояние и выполнить измерения по пункту 7.
10. Вычислить R_{np} и ρ по формулам (17) и (20), найти ρ_{cp} .
11. По окончании измерений выключить напряжение нажатием клавиши 10.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ:

1. Изложить метод измерения удельного сопротивления провода техническим методом с точным измерением силы тока.
2. Изложить метод измерения удельного сопротивления провода с точным измерением напряжения.
3. Дать определения электрического тока, силы тока, плотности тока, сопротивления удельного сопротивления, назвать их единицы измерения.
4. Последовательное и параллельное соединение проводников.

ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ ИНДУКЦИОННЫМ МЕТОДОМ

Лабораторная работа № 62

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: Измерение вертикальной и горизонтальной составляющих магнитного поля Земли индукционным методом. Определение геомагнитной широты точки наблюдения и магнитного момента Земли.

1. ИНДУКЦИОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Метод, применяемый в данной работе, основан на явлении электромагнитной индукции. Оно заключается в том, что при изменении магнитного потока через площадь проводящего контура, в контуре будет протекать индукционный электрический ток. Выражение для индукционного тока может быть получено на основе закона Ома для полной цепи и закона Фарадея:

$$I(t) = -\frac{1}{R} \cdot \frac{d\Phi(t)}{dt},$$

здесь Φ – магнитный поток через площадь охватываемую контуром, а R – его полное электрическое сопротивление.

В настоящей работе изменение магнитного потока происходит при повороте рамки проводящего контура вокруг своей оси. Это изменение является величиной фиксированной и сила тока будет тем больше, чем быстрее меняется магнитный момент. При быстром повороте рамки протекание большого тока длится малое время, а при медленном – слабый ток протекает в течение большего промежутка времени. В результате, полный заряд, протекающий через любое поперечное сечение проводника, не зависит от скорости процесса, а определяется изменением магнитного потока, что выражается формулой

$$Q \equiv \int_{t_1}^{t_2} I(t) dt = -\frac{1}{R} \int_{t_1}^{t_2} \frac{d\Phi}{dt} dt = -\frac{1}{R} \int_{t_1}^{t_2} d\Phi = \frac{\Phi(t_1) - \Phi(t_2)}{R} \quad (1)$$

Если проводящий контур имеет площадь S , а угол между нормалью к площади контура и вектором индукции магнитного поля \vec{B} меняется от α_1 в начале поворота до α_2 в конце, то формула (1) принимает вид

$$Q = \frac{BS}{R} \cdot (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2). \quad (2)$$

Выражение (2) позволяет определить модуль вектора \vec{B} , если известна величина заряда, параметры контура и изменение угла его пространственной ориентации. При этом заряд обычно измеряют с помощью баллистического гальванометра. Для подробного знакомства с этими вопросами следует изучить содержание книги [2] (стр. 407-411).

2. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О МАГНИТНОМ ПОЛЕ ЗЕМЛИ

Хорошо известно, что Земля обладает магнитным полем. С точностью порядка одного процента оно может считаться стационарным, т.е. не зависящим от времени. Нестационарные вариации, происходящие, например, во время геомагнитных бурь, имеют гораздо меньшую амплитуду, которая не превышает одного процента. Поэтому стационарная составляющая геомагнитного поля (см. рис. 1 а), в среднем, имеет дипольный характер, т.е. такую же пространственную конфигурацию, как и у поля создаваемого кольцом с током (**магнитным диполем**) (рис. 1 б). Из рисунка видно, что ось диполя, которую принято называть **геомагнитной осью**, наклонена по отношению к оси вращения Земли на $11,5^\circ$. Точки пересечения геомагнитной оси с земной поверхностью получили название **геомагнитных полюсов**. Следовательно, положения магнитных и географических полюсов не совпадают. Кроме того, поскольку линии индукции, согласно определению, выходят из северного

магнитного полюса, видно, что последний находится в южном полушарии. И наоборот, южный магнитный полюс находится ближе к северному чем к южному географическому полюсу. Магнитная стрелка поворачивается своим северным концом примерно в направлении северного географического полюса, поскольку ее северный полюс притягивается южным магнитным полюсом магнита-Земли. Слова «северный» и «южный» в наименовании геомагнитных полюсов часто опускают.

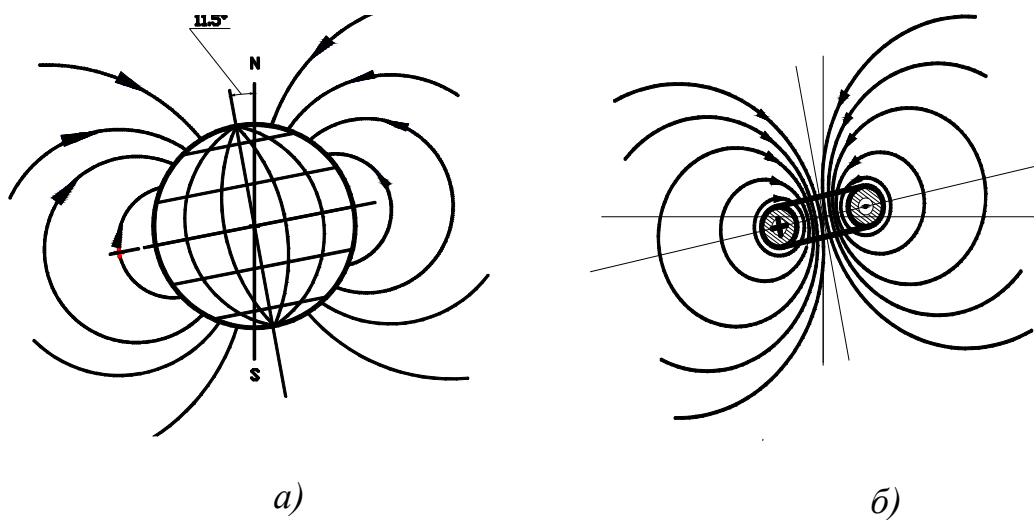


Рис. 1. Магнитные поля дипольного характера: (а) общий вид геомагнитного поля, географических и магнитных полюсов; (б) конфигурация силовых линий магнитного поля кольца с током в вертикальной плоскости симметрии (крестом и точкой указаны направления тока).

На рис.1 а изображена также линия магнитного экватора, плоскость которого перпендикулярна магнитной оси и проходит через центр земного шара. По аналогии с географическими координатами, вводятся также координаты геомагнитные. Например, геомагнитной широтой какой либо точки Земли естественно назвать угол между плоскостью магнитного экватора и радиусом – вектором, проведенным из центра земного шара в эту точку. Величину и направление линий индукции магнитного поля наиболее удобно описывать в зависимости от геомагнитных координат. Поскольку ось симметрии является осью магнитного диполя, то при таком выборе независимых переменных по-

лучатся наиболее простые формулы. Ясно, что величина и направление вектора индукции геомагнитного поля \vec{B} зависят только от модуля радиуса вектора \vec{r} и геомагнитной широты λ . В случае точечного магнитного диполя (кольца с током имеющего радиус R существенно меньший радиуса Земли r_0 $R \ll r_0$), с помощью закона Био – Савара – Лапласа, после интегрирования по длине кольца можно получить следующее выражение для абсолютной величины индукции магнитного поля:

$$B = \frac{\mu_0 p_m}{4\pi r^3} \sqrt{1 + 3 \sin^2 \lambda}; \quad (3)$$

где μ_0 – магнитная постоянная (в системе СИ, $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м); p_m – магнитный момент диполя (в случае кольца радиуса R с током I , равен $p_m = \pi R^2 I$). Формула (3) справедлива для любого точечного магнитного диполя, в том числе и линейного постоянного магнита малых размеров (по сравнению с расстоянием r). В этом случае, угол λ следует отсчитывать от направления перпендикулярного оси магнита. Заметим, что поле любого точечного диполя (магнитного или электростатического) спадает с расстоянием r как $(1/r^3)$.

Из формулы (3) видно, что на геомагнитном экваторе ($\lambda = 0$; $\sin \lambda = 0$), величина магнитного поля на поверхности Земли (при $r = r_0$) наименьшая, а с ростом геомагнитной широты монотонно возрастает, достигая максимальной величины на полюсе. Нетрудно подсчитать, что $B(\pi/2)/B(0) = 2$, то есть на полюсе, величина дипольного поля ровно в два раза больше чем на экваторе.

Направление магнитного поля удобно задавать уравнением линий магнитной индукции $r(\lambda)$, которое имеет достаточно простой вид:

$$r(\lambda) = r_0 \left(\frac{\cos \lambda}{\cos \lambda_0} \right)^2, \quad (4)$$

Параметр λ_0 определяет конкретную силовую линию, которая, при $\lambda = \lambda_0$, достигает поверхности Земли ($r = r_0$). Эта линия индукции изображена на рис.2, где, в качестве λ_0 взята геомагнитная широта Нижнего Новгорода, а за единицу масштаба принят радиус Земли. Видно, что на геомагнитном экваторе ($\lambda = 0$; $\cos \lambda = 1$) удаление линии индукции от центра Земли наибольшее: $r(\lambda = 0) = r_{\max} = r_0 / \cos^2 \lambda_0$. Значения параметра λ_0 могут меняться от нуля до $\pi/2$. С ростом этого параметра, мы переходим к более высоким линиям индукции.

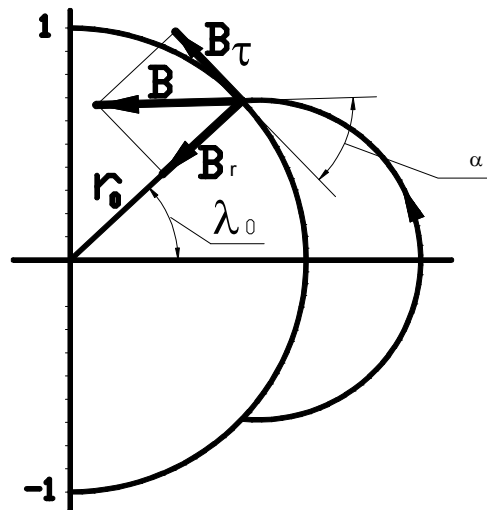


Рис.2 Магнитное полушарие Земли и внешняя часть одной из линий индукции магнитного поля. (За единицу масштаба принят радиус Земли).

Обозначения: λ_0 -геомагнитная широта точки измерения; α -магнитное наклонение.

Приведем также некоторые соотношения, которые являются следствиями формул (3), (4) и будут полезны для выполнения данной лабораторной работы. Горизонтальная \vec{B}_τ (или касательная к поверхности земного шара) и вертикальная (она же радиальная) \vec{B}_r , составляющие вектора \vec{B} связаны соотношениями:

$$|\vec{B}| = \sqrt{B_r^2 + B_\tau^2}; \quad B_r = B \sin \alpha; \quad B_\tau = B \cos \alpha;$$

$$\alpha = \operatorname{arctg}\left(\frac{B_r}{B_\tau}\right) \quad (5)$$

где α , как видно также из рис.2, это угол, который составляет вектор \vec{B} с поверхностью Земли. В специальной литературе этот угол называют **магнитным наклоном**. В данной работе угол α можно рассчитать по измерениям \vec{B}_τ и \vec{B}_r с помощью формул (5). В то же время, из (4) можно получить связь между углом наклона α (углом наклона касательной к линии индукции) и геомагнитной широтой λ_0 :

$$\operatorname{tg}(\alpha) = 2\operatorname{tg}(\lambda_0). \quad (6)$$

Попробуйте потренироваться в дифференцировании и получить соотношение (6) самостоятельно! В лабораторной работе с помощью этого соотношения, зная α , можно определить геомагнитную широту места, где производятся измерения λ_0 .

3. ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА

На рис. 3, представлена схема лабораторной установки. Основными элементами схемы являются индуктор M (проводящая рамка) и баллистический

гальванометр G . Последний, с помощью ключа S_1 , может быть либо замкнут на индуктор (при подключении к клеммам (1)), либо, при подключении S_1 к клеммам (2) и использовании ключа S_2 – на конденсатор C (клеммы (3)), или источник питания I (клеммы (4)).

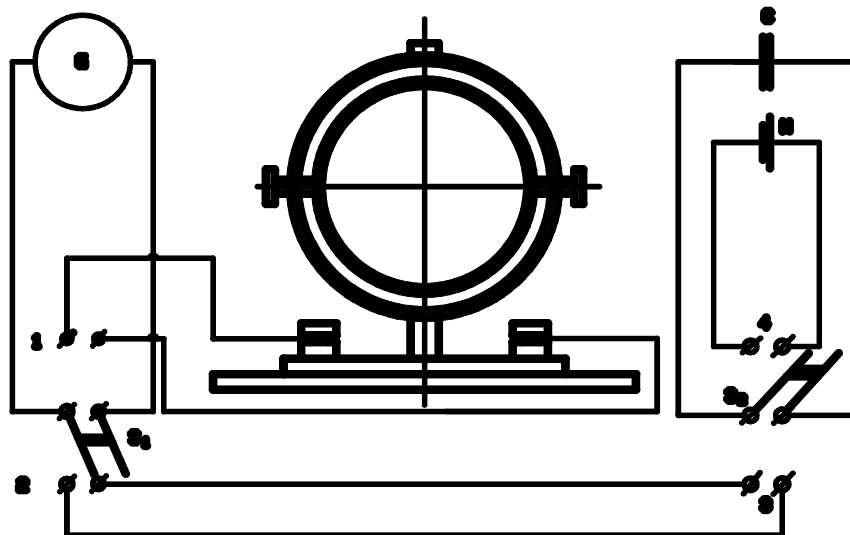


Рис. 3. Схема лабораторной установки

Рассмотрим более подробно основные элементы схемы.

3.1 Индуктор

Прибор, схема которого представлена на рисунке 4, состоит из двух легких колец (1) и (2). По ободу кольца (2) уложено 150 витков тонкой изолированной проволоки, концы которой приведены к клеммам (3). Используемая конструкция предусматривает возможность поворота кольца (1) вокруг вертикальной оси при помощи рукоятки (4), расположенной на стойке (5), а кольца (2) – вокруг оси горизонтальной за рукоятку (6). Для ориентирования колец относительно линий геомагнитного поля, предусмотрена возможность поворота основания индуктора вокруг вертикальной оси. При этом, точность ориентации обеспечивается компасом (7), а фиксация основания в определенном положении – специальными стопорами (8).

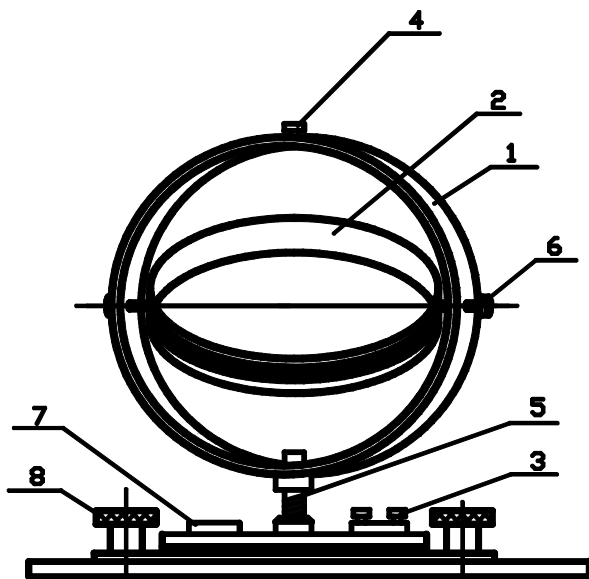


Рис. 4

3.2 Баллистический гальванометр

Настоящий прибор относится к измерительным устройствам магнитоэлектрической системы, основанным на действии постоянного магнита на катушку, через которую идет постоянный ток. К катушке прикреплена пружина, создающая возвращающий момент сил, пропорциональный углу поворота рамки. Являясь прибором высокочувствительным, баллистический гальванометр используется для измерения малых зарядов или токов. При измерении зарядов, принципиальное значение имеет инерционность прибора. Его схема представлена ниже на рис. 5. При прохождении тока, легкая катушка-рамка расположенная между полюсами магнита, поворачивается вместе со стрелкой-указателем, стремясь установиться по магнитному полю. Во время поворота, тонкая металлическая нить закручивается, создавая возвращающий момент. Угол поворота нити, на которой подвешена рамка гальванометра, регистрируется с помощью луча света,

отраженного от зеркала (3) укрепленного на нити.

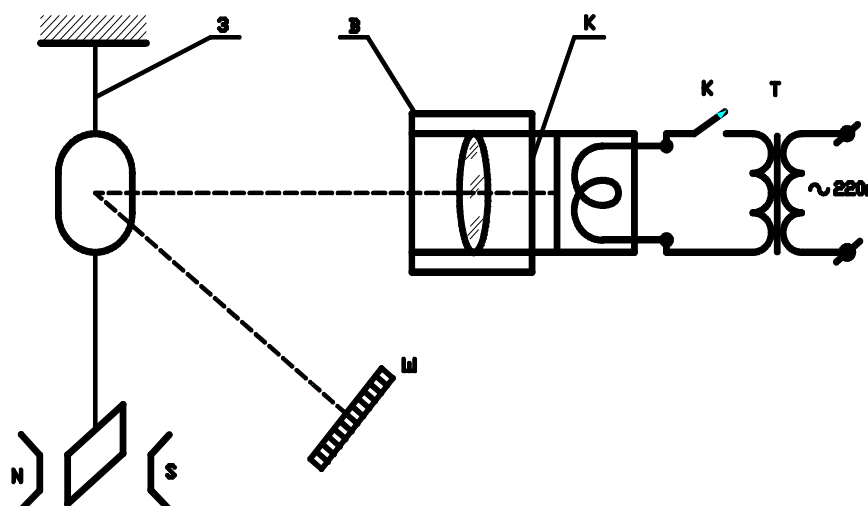


Рис. 5.

С помощью объектива (O) на шкале (III) фокусируется изображение визирной линии (B). Лампа осветителя питается от сети ~ 220 В. Ее включение производится ключом (K).

При протекании кратковременных импульсов тока, отклонение стрелки баллистического гальванометра будет пропорционально протекающему заряду Q :

$$Q = G \cdot n_{\max}, \quad (7)$$

где G – чувствительность гальванометра n_{\max} – максимальное число делений, на которое отклоняется световой «зайчик» от центра шкалы (III) гальванометра при прохождении импульса тока. Следовательно, если известна чувствительность гальванометра, с помощью выражения (7) можно определить электрический заряд, а затем, по формуле (2), рассчитать магнитное поле, в котором производится поворот рамки индуктора.

В настоящей работе, Вам предстоит сначала определить значение, чувствительности, а затем использовать его для дальнейших расчетов. Для этого следует воспользоваться разрядом конденсатора через гальванометр. Предположим, что конденсатор известной емкости C заряжается при напряжении U_0 , следовательно, на конденсаторе накапливается заряд $Q_0 = CU_0$. При замыкании конденсатора на гальванометр, заряд на обкладках изменяется со временем по закону:

$$Q(t) = Q_0 \cdot e^{-\frac{t}{RC}},$$

Сопротивление цепи гальванометра возьмем равным $R=45 \text{ Ом}$. При этом, характерное время τ уменьшения заряда на конденсаторе в e раз равно: $\tau = RC$. В нашей работе $C = 10^{-6} \text{ ф}$, а значит $\tau \approx 5 \cdot 10^{-5} \text{ с}$, что во много раз меньше периода колебаний рамки. Поэтому можно считать что заряд протекает через прибор практически мгновенно, а его величина равна $Q_0 = CU_0$.

Таким образом, чувствительность гальванометра, т.е. величина **заряд**, протекающего через прибор при отклонении стрелки на одно деление шкалы, может быть вычислена по формуле:

$$G = \frac{CU_0}{n_{\max}}, \quad \left(\frac{\text{Кл}}{\text{дел.}} \right) \quad (8)$$

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

4.1 Определение чувствительности гальванометра

1. Подключить к сети электропитания (220В) гальванометр G (рис. 3) и с помощью регулятора, расположенного на его корпусе, установить на нулевую отметку шкалы световой «зайчик». При этом оба переключателя S_1 и S_2 должны находиться в нейтральном положении.
2. Подключить к сети источник питания (И) и с помощью регулятора, расположенного на его корпусе, установить выходное напряжение 10 В по вольтметру на в корпусе источника.
3. С помощью ключа S_1 , подключить гальванометр к клеммам 2, а с помощью S_2 – конденсатор C к источнику питания, соединив с клеммами 4.
4. Разрядить конденсатор C на гальванометр, перебросив ключ S_2 на клеммы 3. При этом, необходимо зарегистрировать отброс светового

указателя («зайчика») по шкале гальванометра (в количестве делений).

5. Используя величину отброса указателя, определить, пользуясь уравнением (18), чувствительность гальванометра.
6. Действия, указанные в пунктах 3-5, повторить не менее пяти раз .
7. Из полученных данных, вычислить среднее значение $\langle n_{max} \rangle$ и чувствительности $\langle G \rangle$.
8. Результаты измерений занести в таблицу 1.
9. Убедитесь в линейности шкалы прибора. Для этого проделайте пункты 2-5 с вдвое меньшим напряжением. Убедитесь, что при этом отброс зайчика уменьшится также вдвое, а чувствительность прибора останется прежней.

Таблица 1

№ опыта	Отклонения светового указателя и соответствующее значение чувствительности			
	n_{max} , дел.	$\langle n_{max} \rangle$, дел.	G , Кл/дел.	$\langle G \rangle$, Кл/дел.
1.				
...				
5.				

4.2 Определение горизонтальной составляющей индукции геомагнитного поля.

1. При помощи рукоятки **(4)** (см. рис. 4) осторожно повернуть кольцо **(1)** индуктора по часовой стрелке (или против нее) вокруг вертикальной оси до упора. После этого, совместить плоскости обоих колец **((1) и (2))**, слегка ослабить стопорные гайки **(8)** повернув их против часовой стрелки, повернуть все основание индуктора так чтобы плоскости совмещенных колец оказались перпендикулярными плоскости магнитного меридиана и снова зафиксировать положение основания, слегка **(не**

- прикладывая больших усилий !)** повернув стопоры **(8)** по часовой стрелке. При этом, для точности ориентации следует пользоваться компасом **(7)**, магнитная стрелка которого всегда располагается в плоскости магнитного меридиана.
2. Перебросив ключ S_1 на клеммы 1, замкнуть индуктор на гальванометр.
 3. Быстро повернуть за рукоятку **(4)** плоскости обоих колец на 180° заметив при этом отброс «зайчика» n_{\max} по шкале гальванометра.
 4. Повторить действия указанные в пунктах 3, 4 не менее пяти раз и из всех полученных значений вычислить среднюю величину $\langle n_{\max} \rangle$.
 5. Зная $\langle n_{\max} \rangle$ и среднюю величину определенной ранее чувствительности $\langle G \rangle$, определить заряд, прошедший через гальванометр при повороте колец: $Q = \langle G \rangle \cdot \langle n_{\max} \rangle$.
 6. Получив величину Q , определить, с помощью формулы (2), величину горизонтальной составляющей геомагнитного поля, учитывая что $\alpha_1 = 0, \alpha_2 = \pi$, а под S следует понимать суммарную площадь всех витков.
 7. Полученные результаты занести в таблицу 2.

Таблица 2

№ опыта	n_{\max} , дел.	$\langle n_{\max} \rangle$, дел.	Q , Кл.	B_τ , Тл.
1.				
.....				
5.				

4.3 Определение вертикальной составляющей индукции геомагнитного поля.

1. Совместить кольца **(1 и 2)** магнитного индуктора и по компасу установить так, чтобы их плоскости были параллельны плоскости магнитного меридиана. При этом, если требуется, снова повернуть вокруг вертикальной оси основание индуктора, предварительно ослабив, а потом зафиксировав стопорные гайки **(8)**.

2. Перебросив ключ S_1 на клеммы 1, замкнуть индуктор на гальванометр.
3. Быстро повернуть за рукоятку (6) кольцо (2) на 90^0 , заметив при этом на шкале гальванометра величину отброса n_{\max} светового указателя. Опыт повторить не менее пяти раз. Из всех полученных значений вычислить среднюю величину $\langle n_{\max} \rangle$.
4. Зная $\langle n_{\max} \rangle$ и среднюю величину определенной ранее чувствительности $\langle G \rangle$, определить заряд, прошедший через гальванометр при повороте кольца: $Q = \langle G \rangle \cdot \langle n_{\max} \rangle$.
5. Определить, с помощью формулы (2), величину вертикальной составляющей геомагнитного поля, учитывая что $\alpha_1 = 0, \alpha_2 = \pi/2$, а под S следует понимать суммарную площадь всех витков.
6. Полученные результаты занести в таблицу 3.

Таблица 3

№ опыта	n_{\max} , дел.	$\langle n_{\max} \rangle$, дел.	Q , Кл.	B_r , Тл.
1.				
...				
5.				

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

По найденным значениям B_r и B_r , необходимо последовательно определить:

- Модуль вектора \vec{B} и магнитное склонение по формулам (5);
- Геомагнитную широту точки наблюдения, используя (6);
- Магнитный момент Земли по формуле (3).

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ ТВОРЧЕСКОГО ХАРАКТЕРА

(для тех, кто претендует на высший балл)

Вам предлагается придумать способ измерения магнитного поля постоянного магнита и его магнитного момента с помощью данной лабораторной установки. Если Вы имеете конкретные идеи по этому вопросу, обсудите их со

своим преподавателем и получите у него постоянный магнит для производства измерений. Вам будет необходимо:

- Измерить поле на оси магнита на определенном удалении от него;
- Измерить поле в точке на том же удалении, но в направлении, перпендикулярном оси магнита.
- Проверить, близко ли поле магнита к дипольному, по направлению силовых линий в измеренных точках, и соответствует ли отношение полей формуле (3).
- Определить магнитный момент (считая, что поле имеет дипольный вид).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Общие законы и физические понятия, которые необходимо знать:

- Магнитное поле, его основные характеристики.
- Закон Био-Савара-Лапласа и его применение для расчета магнитных полей (вычислить поле на оси кольца).
- Закон Ампера. Выражение для вращающего момента, действующего на рамку с током в магнитном поле. Работа магнитного поля по перемещению проводника с током.
- Явление электромагнитной индукции. Правило Ленца.

2. Индукционный метод измерения магнитного поля.

- Какие явления происходят при повороте рамки в магнитном поле и как быстро нужно вращать рамку при измерениях?
- Предположим, что рамку, расположенную вертикально, в плоскости магнитного меридиана можно повернуть в горизонтальное положение двумя способами: а) поворотом на 90^0 и б) сделав один полный оборот плюс 90^0 (в настоящей лабораторной работе возможность такого поворота отсутствует). Во сколько раз изменятся показания прибора в случае б) по сравнению со случаем а)?

- Что покажет гальванометр, если вертикальную рамку, ориентированную перпендикулярно магнитному меридиану, поворачивать в горизонтальное положение а) на 90^0 ; б) на 360^0+90^0 ?
- Что покажет гальванометр, если вертикальную рамку, ориентированную в плоскости магнитного меридиана, повернуть на 180 градусов а) вокруг горизонтальной оси, б) вокруг вертикальной оси? Как изменятся ответы, если угол поворота а) удвоить, б) сделать равным 90^0 ?

3. Физические особенности баллистического гальванометра.

- Чем баллистический гальванометр отличается от обычного гальванометра? В каком случае отклонение подвижной части баллистического гальванометра пропорционально заряду, протекающему через его рамку?
- Что такое чувствительность гальванометра и как ее определяют?
- Можно ли добиться отклонения стрелки гальванометра (не наклоняя его) имея в распоряжении лишь полосовой магнит? Объяснить, как это сделать.

4. Геомагнитное поле как поле магнитного диполя.

- Получить (или изучить формулы вывод по учебнику) выражение для индукции магнитного поля на оси кругового кольца с током, как в плоскости кольца, так и на удалении от него. Убедиться, что полученные формулы являются частным случаем формулы (3).
- Как ориентировано магнитное поле относительно географических полюсов? Что такое геомагнитная широта, чем определяется угол наклона магнитного поля к поверхности Земли?
- Во сколько раз поле на оси магнитного диполя больше поля на его магнитном экваторе?
- Что такое магнитный момент и как от него зависит величина магнитного поля, создаваемого магнитом?

- Пользуясь формулами (5),(6), получите выражения для $B_r(\lambda_0)$ и $B_r(\lambda_0)$.
- Вычислите, с помощью формулы (4) наибольшее расстояние от поверхности Земли до линии индукции магнитного поля, проходящей через Нижний Новгород. Используйте также данные измерений.

5. Задачи по теме лабораторной работы: № № 11.24; 11.42; 11.55; 11.60 из задачника *Волькенштейн В. С.* 2003г., или № № 11.15; 11.49; 11.60; 11.66 из того же задачника других лет издания.

- Медное кольцо висит на нитке в вертикальной плоскости. К нему подносят сначала железный стержень, а затем постоянный магнит. Что будет происходить с кольцом в первом и втором случаях ?
- Будет ли магнитное поле Земли индуцировать токи в искусственном спутнике Земли, движущемся: а) в плоскости экватора; б) в плоскости, проходящей через полюсы ? Как эти токи будут влиять на движение спутника ?
- Будет ли возникать индукционный ток в круговом витке, находящемся в однородном магнитном поле, если: а) перемещать виток поступательно; б) вращать виток вокруг оси, проходящей через центр перпендикулярно плоскости витка; в) вращать виток вокруг оси, лежащей в его плоскости. Рассмотреть возможность разных ориентаций.

6. Найти разность потенциалов, возникающую между концами крыльев самолета, размах крыльев которого $l=36,5$ м. Самолет летит горизонтально со скоростью $v = 900$ км/ч. (Вертикальную составляющую вектора индукции магнитного поля Земли взять из результатов настоящей лабораторной работы).

Литература

[1] Савельев И. В. Курс общей физики, ч. 2, М.: Наука, 1987, 432с.

- [2] Зисман Г. А., Тодес О. М. Курс общей физики, ч. 2, М.: Наука, 1974, 352с.
- [3] Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике, М.: Наука, 1964, 847 с.
- [4] Яворский Б. М., Селезнев Ю. А. Справочное руководство по физике, М.: Наука, 1989, 576с.
- [5] Яворский Б. М., Пинский А. А. Основы физики, ч. 1, М.: Наука, 1974, 496с.
- [6] Фриш С. Э., Тиморева А. В. Курс общей физики, Т.2 СПб.: Изд. «Лань», 2006, 407-410с.
- [7] Жарков В. Н. Внутреннее строение Земли и планет, М.: Наука, 1983, 415 с.
- [8] Волькенштейн В. С. Сборник задач по общему курсу физики, М.: Наука, 1990, 397с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКА

Лабораторная работа № 63

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: Определение температурного коэффициента сопротивления и коэффициента теплопроводности меди путем исследования образца проводника при различных рабочих температурах.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Классическая теория проводимости металлов развита немецким физиком *П. Друде*, голландским физиком *Г. А. Лоренцем* и другими исследователями основана на представлении о том, что кристаллическая решетка металла образована положительными ионами, окруженными свободными электронами. Ионы, располагаясь в узлах решетки и совершая небольшие колебания около своих положений равновесия, образуют твердый каркас металлического тела. Свободные же электроны (т. е. бывшие валентные электроны, потерявшие связь со своими атомами) совершают хаотическое движение в промежутках между ионами испытывая столкновения с последними.

Представим модель металлического проводника на рисунке 1,а. Если к его торцам приложить разность потенциалов ($\varphi_1 - \varphi_2$), то возникающее в провод-

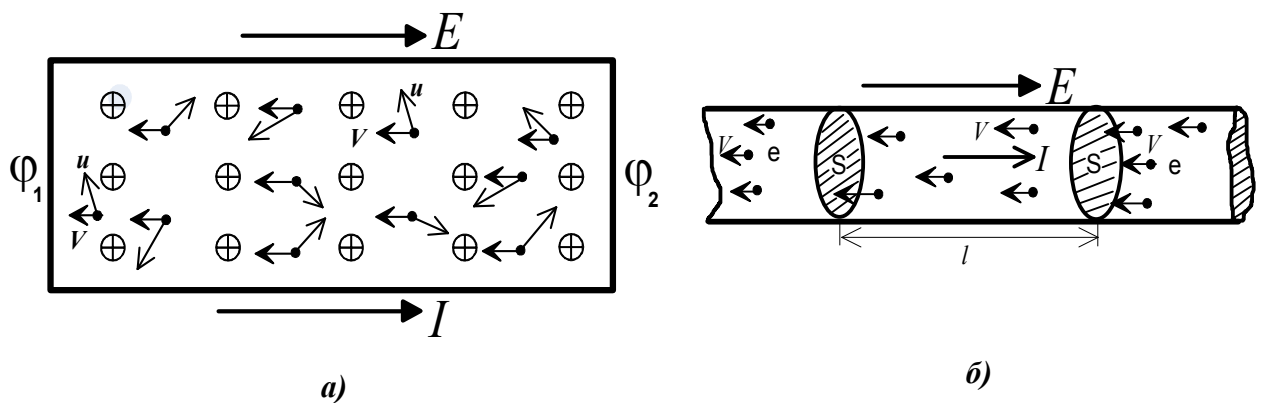


Рис. 1 ⊕ - положительные ионы, ● - свободные электроны;
u - скорость теплового движения; *V* - скорость упорядоченного движения. ($V \ll u$)

нике электрическое поле напряженностью E вызовет дополнительное (упорядоченное) движение свободных электронов со скоростью V . Это движение будет направленно противоположно электрическому полю, что эквивалентно появлению тока I в направлении поля. Для его определения, выделим в проводнике участок длиной l (см. рис. 1,б). За промежуток времени $\Delta t = l/V$ все свободные электроны, содержащиеся в объеме этого участка, пройдут через его левое сечение S , перенеся суммарный заряд $\Delta q = en_0Sl = en_0SV\Delta t$, где e – заряд электрона, n_0 – концентрация свободных электронов. Тогда, учитывая, что $I = \Delta q / \Delta t$, получим

$$I = en_0VS \quad (1)$$

Согласно (1), сила тока в металлическом проводнике пропорциональна скорости V упорядоченного движения электронов (см. также стр.14 **Приложения**). Величина V будет увеличиваться при увеличении напряженности электрического поля, т. е. при увеличении приложенного к проводнику напряжения. С другой стороны, V будет увеличиваться с уменьшением числа столкновений электронов с ионами, т.е. с уменьшением сопротивления проводника.

Удельное сопротивление зависит от температуры, поскольку, с ее повышением усиливается колебательное движение ионов металлической решетки затрудняющее упорядоченное движение электронов. Эту зависимость можно охарактеризовать **температурным коэффициентом сопротивления** данного вещества, который дает относительное приращение сопротивления при увеличении температуры на один градус

$$\alpha = \frac{1}{\rho_0} \frac{(\rho - \rho_0)}{\Delta T}, \quad \text{откуда} \quad \rho = \rho_0(1 + \alpha\Delta T) \quad (2)$$

Согласно (2), относительное изменение удельного сопротивления проводника $(\rho - \rho_0)/\rho_0$ пропорционально изменению его абсолютной температуры ΔT , (где ρ_0 – значение удельного сопротивления при 0°C , а ρ – его значение

при конкретной рабочей температуре). Строго говоря, величина α сама зависит от температуры, и ρ изменяется с температурой не по линейному закону, а зависит более сложным образом. Однако для многих проводников, к которым относятся все металлы, изменение α с температурой оказывается незначительным. Поэтому, если рассматриваемый интервал ΔT достаточно мал, то внутри его, α можно приближенно считать постоянным, равным среднему значению для данной области температур.

Следует отметить, что на зависимости сопротивления от температуры основано устройство различных измерительных приборов. Наиболее важными из них являются *электротермометры сопротивления*, с помощью которых по сопротивлению проводника определяется соответствующая температура.

Свободные электроны переносят в металле не только свой электрический заряд, обеспечивая электропроводность металла, но и кинетическую энергию своего хаотического движения из области повышенной температуры в область более низких температур обеспечивая металлу *теплопроводность*, которая, согласно определению, представляет собой *направленный перенос внутренней энергии*. Процесс теплопроводности описывается законом Фурье

$$\Delta Q = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} \Delta S \cdot \Delta t, \quad (3)$$

где ΔQ – количество теплоты (внутренней энергии), переносимое за время Δt через поверхность ΔS , расположенную перпендикулярно к оси x , отношение $\Delta T / \Delta x$ – *градиент температуры* (в данном случае, вдоль оси x), λ – *коэффициент теплопроводности*. (Знак минус в правой части (3) отражает именно то обстоятельство, что перенос тепловой энергии осуществляется в направлении убывания температуры).

Можно сказать, что у металлов, теплопроводность пропорциональна их удельной электрической проводимости $\sigma = 1/\rho$ (т. е. величине обратной удельному электрическому сопротивлению). Такое заключение качественно

соответствует закону Видемана-Франца, согласно которому у металлов отношение λ к удельной проводимости σ пропорционально абсолютной температуре T

$$\frac{\lambda}{\sigma} = LT \quad (4)$$

Коэффициент пропорциональности (L), известен как число Лоренца.

Из (3),(4) видно, что если единицей измерения ΔQ служит Вт (ватт), а следовательно, λ измеряется в (Вт/(м·К)), то с учетом того что удельная проводимость – в (1/(Ом·м)), L имеет размерность (В²/К²). Величина L имеет приблизительно одинаковое значение для всех металлов. Для большинства из них, при 300°К, численное значение L находится в пределах $(2,1 - 2,8) \cdot 10^{-8}$, В²/К². (уменьшается по мере приближения температуры к абсолютному нулю). При расчетах, обычно принимается $L = 2,4 \cdot 10^{-8}$, В²/К². (Обоснование этого значения представлено в **Приложении**).

СХЕМА ОПЫТА И ВЫВОД РАСЧЕТНОЙ ФОРМУЛЫ

В настоящей работе, используется одинарный измерительный мост, известный как *мостик Уитстона*, схема которого представлена на рисунке 2.

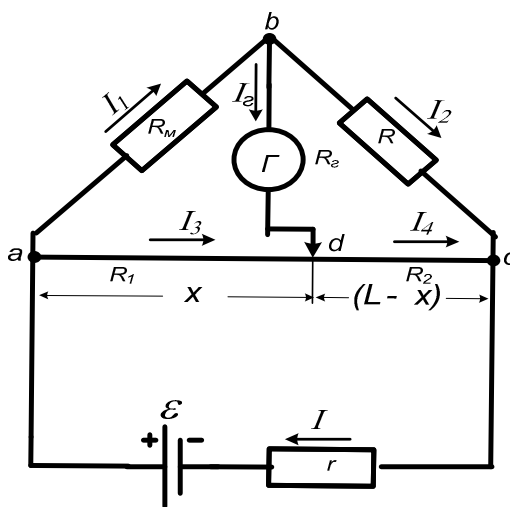


Рис. 2 Схема реохордного мостика Уитстона.

Ветви цепи с сопротивлениями R_m , R , R_1 и R_2 образуют так называемые плечи моста. В одну из диагоналей (**ac**) включена батарея с э. д. с. \mathcal{E} и внутренним сопротивлением r . В другую диагональ (**bd**) - гальванометр с сопротивлением R_2 . При наличии тока текущего через гальванометр ($I_2 \neq 0$), мост *неравновесный* (небалансный). Однако, изменяя сопротивления плеч, его можно сбалансировать (т. е., добиться такого положения, чтобы $I_2 = 0$). В схеме *реохордного* моста (рис. 2), для этого предусмотрена возможность изменения величин R_1 и R_2 путем перемещения скользящего контакта: сопротивления участка (**ac**) представляют собой одну калиброванную проволоку (*реохорд*), а контакт гальванометра с реохордом (точка d) сделан подвижным и позволяет осуществлять плавную регулировку величин R_1 , R_2 .

Используя первое и второе правила Кирхгофа, запишем уравнения, соответственно, для узлов (**a**), (**b**), (**c**) и контуров (**a,b,c, \mathcal{E}, a**), (**a,b,d,a**) и (**b,c,d,b**) схемы

$$\begin{cases} I_1 + I_3 - I = 0 \\ I_1 - I_2 - I_2 = 0 \\ I_2 + I_4 - I = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} Ir + I_1 R_m + I_2 R = \mathcal{E} \\ I_1 R_m - I_3 R_1 + I_2 R_2 = 0 \\ I_2 R - I_4 R_2 - I_2 R_2 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

Из представленных шести уравнений (5) можно определить шесть неизвестных. При известных сопротивлениях и э. д. с., такими неизвестными будут токи, текущие в ветвях цепи.

Получим с помощью (5) выражение для тока текущего через гальванометр (I_2), учитывая что $\mathcal{E} = Ir + U$ (где U – разность потенциалов между точками (**a**) и (**c**)) для неравновесного моста,

$$I_2 = U \frac{RR_1 - R_m R_2}{(R_2(R_m + R) + R_m R)(R_1 + R_2) + R_1 R_2 (R_m + R_2)} \quad (6)$$

Формула (6) справедлива для неравновесного моста ($I_2 \neq 0$). Если в результате изменения сопротивлений R_1 и R_2 сделать равным нулю ток идущий через гальванометр ($I_2 = 0$), то из (6) следует

$$RR_1 - R_M R_2 = 0, \quad \text{откуда} \quad R = R_M (R_2 / R_1)$$

Последнее выражение, с учетом того что $R_1 = \rho(x/S)$, а $R_2 = \rho(L - x)/S$ (где x и L – соответственно, длина (**ad**) и (**dc**) проволоки (реохорда) с площадью поперечного сечения S и удельным сопротивлением ρ) будет иметь следующий вид

$$R = R_M \frac{(L - x)}{x} \quad (7)$$

Следовательно, отношение сопротивлений R_2/R_1 равно отношению длин обоих участков реохорда.

В настоящей работе, по мере остывания сопротивления R предварительно нагретого водяным паром, нарушается баланс моста, что приводит к появлению тока I_2 в измерительной диагонали (**bd**) (см. рис. 2). Положений равновесия, при которых $I_2 = 0$, добиваются в результате изменения сопротивлений R_1 и R_2 , путем перемещения подвижного контакта гальванометра с реохордом (точка d). В момент достигнутого таким способом равновесия, измеряется положение движка на шкале, расположенной параллельно реохорду и по формуле (7) определяется значение R соответствующее конкретной температуре нагрева.

ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА

Общий вид экспериментальной установки показан на рис.3. Исследуемые образцы проводников, изготовленные в виде катушек тонкого (диаметр < 1 мм) медного изолированного провода, располагаются внутри контейнера (1) и подключаются, соответственно, к зажимам **I** и **II**. Нагрев образцов осуществляется водяным паром, поступающим из сосуда (2), который оснащен электрическим кипятильником, работающим от напряжения сети 220 В. Для регулирования напряжения, применяется автотрансформатор (3). При этом, контроль температуры образцов осуществляется при помощи термометра (4)

находящегося в установленном на контейнере (1) пенале (5). Пар и вода, образующаяся при конденсации, отводятся в сосуд (6).

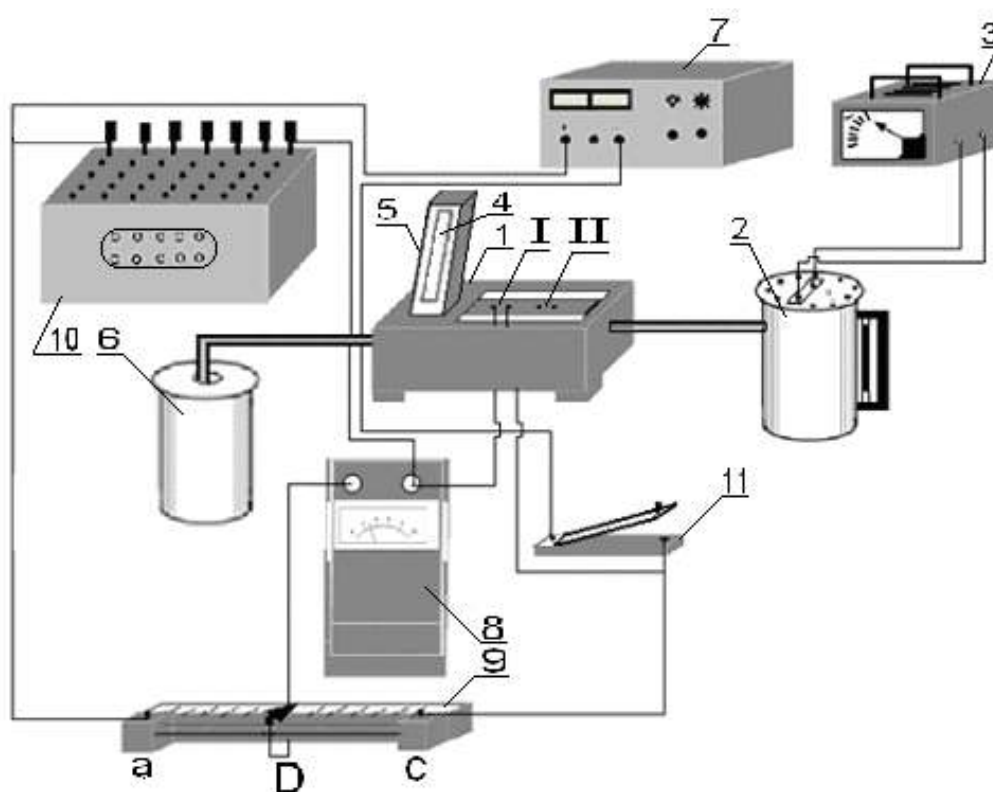


Рис. 3. Экспериментальная установка

Электрическая схема установки представляет собой реохордный мостик Уитстона (рис. 1) с источником питания (7) и гальванометром (8), в котором R_1 и R_2 - сопротивления, соответственно, участков проволоки реохорда (9): $(a-D)$, длины x и $(D-c)$ - длины $(L-x)$. В качестве R_m , выступает сопротивление, устанавливаемое с помощью магазина сопротивлений (10). При замыкании ключа (11), схема приходит в рабочее состояние.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

- 9) Проверить экспериментальную установку на предмет соответствия схеме представленной на рисунке 3 и отсутствия повреждений. В том случае если имеются нарушенные контакты, их необходимо восстано-

вить до подключения к сети. При более серьезных нарушениях (поломка приборов, обрывы проводов, и. т. д.) следует обратиться к преподавателю или лаборанту.

10) По указанию преподавателя выбрать измеряемое сопротивление (R): т. е. включить в плечо измерительного моста (**bc**) (см. также рис. 2) одно из двух сопротивлений помещенных в контейнер (1). Это можно сделать, подключившись к клеммам (I), или (II). (На рис. 3. задействовано сопротивление, подключенное к клеммам (I)).

11) Включить источник питания (7) в сеть 220В и с помощью магазина сопротивлений (10) установить нулевое значение сопротивления R_m . Замкнуть ключ (11) и убедиться в том, что стрелка гальванометра (8) при этом резко отклоняется от занимаемого ей ранее нулевого положения (в середине шкалы).

Установить большое значение сопротивления R_m ($\sim 10^6$ Ом) и замкнув ключ (11) и убедиться в том, что стрелка гальванометра (8) снова отклоняется от занимаемого ей ранее нулевого положения, но уже в другую сторону.

12) С помощью магазина сопротивлений (10) установить такое значение сопротивления R_m , при котором измерительный мост измерял бы значение R с минимальной погрешностью (см. значение рекомендуемого R_m на столе размещения установки).

Проконтролировать наличие воды в кипятильнике (2) с помощью прозрачной трубки-индикатора, которым оснащена его рукоятка (при необходимости, воду следует долить, обратившись к лаборанту).

Задание №1

1 Подать питающее напряжение на кипятильник (оно контролируется с помощью вольтметра автотрансформатора и должно составлять ~ 120 В), включив в сеть автотрансформатор (3). После начала процесса кипения воды и образования пара (это может занять несколько минут!)

довести температуру (контролируемую с помощью термометра (4)) измеряемого сопротивления \sim до 95°C .

- 2 С помощью измерительного моста произвести замер сопротивления R при максимальной температуре (95°C). Для этого необходимо, во-первых, замкнуть ключ (11) и убедиться в том, что имеет место разбалансировка моста (стрелка гальванометра (8) отклоняется от нулевой отметки). Далее, путем перемещения подвижного контакта реохорда (d) добиться такого положения, чтобы стрелка гальванометра снова совместилась с нулевой отметкой. Значения длин обоих участков реохорда: x и $(L_1 - x)$, соответствующих этому положению, следует занести в таблицу 1.
- 3 Отключить подачу питающего напряжения на кипятильник (т. е. выключить автотрансформатор (3)) и по мере остывания сопротивления R (с $t = 95^{\circ}\text{C}$ до $t = 45^{\circ}\text{C}$), через интервал $\Delta t = 5^{\circ}\text{C}$, произвести измерения его величины, так как это указано в пункте 2.
- 4 Полученные результаты измерений (их должно быть не меньше одиннадцати) занести в таблицу 1 и для каждого из них, с помощью формулы (6), определить значение сопротивления R .
- 5 Построить график зависимости R от t , по которому определить значение исследуемого сопротивления при $t = 0^{\circ}\text{C}$. Пользуясь формулой (2), определить для каждого опыта значение температурного коэффициента сопротивления α , а также среднее значение $\langle \alpha \rangle$. Результаты занести в таблицу 1.
- 6 Построить график зависимости R от t , по которому определить значение исследуемого сопротивления при $t = 0^{\circ}\text{C}$. Пользуясь формулой (2), определить для каждого опыта значение температурного коэффициента сопротивления α , а также среднее значение $\langle \alpha \rangle$. Результаты занести в таблицу.

Таблица 1

№ опыта	Температура сопротивления R	Длины участков реохорда,		Измеряемое сопротивление,	Температурный коэффициент сопротивления	
	$^{\circ}C$	см		Ом	град $^{-1}$	
	t ,	x	$(L_1 - x)$	R	α	$\langle \alpha \rangle$
1						
.						
.						
.						
11						

Задание №2

- Используя полученные значения R , с помощью известной формулы для цилиндрических проводников $R = \rho(l/S)$, определить величины удельных сопротивлений (ρ) исследуемого проводника при различных абсолютных температурах T . При проведении расчетов использовать значения длины и диаметра проводника представленные на рабочем столе установки и полагать, что во всем диапазоне изменения температуры выполняется условие $l/S = const$.
- С помощью формулы (3) определить значения коэффициентов теплопроводности (λ) исследуемого проводника при различных температурах T .

Результаты расчетов по пунктам (1) и (2) занести в таблицу 2 и построить график зависимости: $\lambda = f(T)$.

Таблица 2

№ опыта	Температура сопротивления R	Удельное сопротивление	Коэффициент теплопроводности
	$^{\circ}K$	$Ом \cdot м$	$Вт/м \cdot K$
	$T,$	ρ_2	λ
1			
.			
.			
.			
11.			

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 7) Электропроводность металлов.
- 8) Измерительный мост постоянного тока. Принцип работы .
- 9) Объяснить причину отклонений стрелки гальванометра в разные направления от нулевого положения, которое имеет место при выполнении пункта 3 из раздела ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.
- 10) Теплопроводность металлов. Связь теплопроводности с электропроводностью.
- 11) По проводнику проходит ток силой 10 А. Определить общую массу электронов, проходящих через поперечное сечение проводника за 1 час. ($e = 1,6 \cdot 10^{-19} Кл$; $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} кг$) (Ответ: 0,2 мг).
- 12) Реостат из железной проволоки, миллиамперметр и источник ЭДС включены последовательно. При температуре $0^{\circ} C$ сопротивление реостата $200 Ом$, а сопротивление миллиамперметра $20 Ом$. Миллиамперметр показывает $30 мА$. Каким будет его показание, если реостат нагреется до $50^{\circ} C$? Внутренним сопротивлением источника, а также изменением сопротивления миллиамперметра при нагревании пренебречь. (термический коэффициент сопротивления железа $\alpha = 6 \cdot 10^{-3} K^{-1}$). (Ответ: $I \approx 2,36 \cdot 10^{-2} А$).

- 13) По проводнику с площадью поперечного сечения 50 мм^2 течет ток. Средняя скорость упорядоченного движения свободных электронов $0,282 \text{ мм/с}$, а их концентрация $7,9 \cdot 10^{27} \cdot \text{м}^{-3}$. Найти силу тока и плотность тока в проводнике. (Ответ: $I = 17,8 \text{ А}$; $j = 3,56 \cdot 10^5 \text{ А/м}^2$).
- 14) На сколько процентов изменится мощность, потребляемая обмоткой генератора из медной проволоки, при изменении температуры от $t_0 = 0 \text{ }^\circ\text{С}$ до $t_1 = 30 \text{ }^\circ\text{С}$? (Ответ: уменьшится на 11%).

Приложение

Используя основные положения электронной теории проводимости металлов, выведем закон Видемана-Франца. Для этого предварительно определим среднюю скорость упорядоченного движения электронов V на участке проводника l (см. рис. 1, б). Учитывая, что движение имеет характер свободных пробегов d между двумя последовательными столкновениями с ионами, что в начале каждого пробега (после столкновения) $V = 0$ и то что после столкновения электрон двигаясь равноускоренно, под действием электрического поля, имеет перед следующим столкновением максимальную скорость V_{max} запишем выражение

$$V = (0 + V_{\text{max}}) / 2 = V_{\text{max}} / 2 \quad (8)$$

$V_{\text{max}} = a\tau$, где a – ускорение, сообщаемое электрону электрическим полем; τ – время свободного пробега. Поскольку скорость электрона на пути d складывается (геометрически) из скорости хаотического (теплого) u и упорядоченного движения V то вполне очевидно, что $\tau = d / (V + u)$. Однако, учитывая что $V \ll u$, можно считать $\tau = d / u$. Далее, приравняв выражение силы F ускоряющей движение электрона: $F = eE$ и $F = ma$ (где e и m – соответственно, заряд и масса электрона), получим: $a = eE / m$. Следовательно, $V_{\text{max}} = eEd / (mu)$ или, с учетом того что $E = U / l$,

$$V_{\text{max}} = eUd / (mul)$$

откуда, согласно (8),

$$V = eUd / (2mul) \quad (9)$$

Подставив (9) в (1), получим выражение для силы тока в проводнике

$$I = \frac{Ue^2 n_0 d S}{2m\mu l},$$

которое представляет собой не что иное, как закон Ома ($I = U / R$) для участка проводника l с сопротивлением $R = 2m\mu l / (e^2 n_0 d S)$. Сопоставляя последнее равенство с известной формулой для сопротивления проводника $R = \rho l / S$, получим выражение для удельного сопротивления

$$\rho = 2m\mu / (e^2 n_0 d)$$

Согласно этому выражению, удельная проводимость металла

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{e^2 n_0 d}{2m\mu}$$

Полагая что у металлов теплопроводность осуществляется только за счет перемещения свободных электронов и используя известное выражение для теплопроводности электронного газа: $\lambda = du \delta C_v / 3$ (где d – средняя длина свободного пробега, u – тепловая скорость электронов, δ – плотность электронного газа, C_v – удельная теплоемкость при постоянном объеме), составим отношение

$$\frac{\lambda}{\sigma} = \frac{2m\mu^2 \delta C_v}{3e^2 n_0}$$

Учитывая то что $\delta = mn_0$, а также следующие известные соотношения кинетической теории идеального газа:

$$\frac{m\mu^2}{2} = \frac{3}{2} kT, \quad C_v = \frac{3}{2} \frac{R}{\mu}, \quad R = N_A k, \quad \mu = N_A m$$

(где k – постоянная Больцмана, R – универсальная газовая постоянная, N_A – постоянная Авогадро, μ – молярная масса, T – термодинамическая температура электронного газа) получим соотношение выражающее закон Видемана-Франца

$$\frac{\lambda}{\sigma} = \frac{3k^2}{e^2} T,$$

где множитель $\frac{3k^2}{e^2}$ совпадает по размерности и оказывается близким по значению к коэффициенту L в формуле (4):

$$\frac{3k^2}{e^2} = \frac{3 \cdot (1,38 \cdot 10^{-23})^2 \text{ Дж}^2 / \text{К}^2}{(1,6 \cdot 10^{-19})^2 \text{ Кл}^2} = 2,23 \cdot 10^{-8} \text{ В}^2 / \text{К}^2$$

Литература

- [1] Савельев И. В. Курс общей физики, ч. 2, С.-Петербург,-М.,-Краснодар: Изд. «Лань», 2007, 496с.
- [2] Зисман Г. А., Тодес О. М. Курс общей физики, ч. 2, : Наука, 1974, 352с.
- [3] Яворский Б. М., Детлаф А. А. Курс физики, М.: Изд. Центр Академия, 2007, 720с.
- [4] Яворский Б. М., Детлаф А. А., Лебедев А.К., Справочник по физике, М.: Изд. ОНИКС, 1054с.
- [5] Яворский Б. М., Селезнев Ю. А. Справочное руководство по физике, М.: Наука, 1989, 576с.
- [6] Яворский Б. М., Пинский А. А. Основы физики, ч. 1, М.: Наука, 1974, 496с.
- [7] Трофимова Т. И., Курс физики, М.: Изд. Центр «Академия», 2007, 558с.
- [8] Фриш С. Э., Тиморева А. В. Курс общей физики, Т.2 СПб.: Изд. «Лань», 2006, 407-410с.
- [9] Элементарный учебник физики// Под. ред. Г.А. Ландсберга, ч. 2, М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006, 479с.
- [10] Дмитриева В. Ф. Физика, М.: Изд. Центр Академия, 2006, 461с.
- [11] Волькенштейн В. С. Сборник задач по общему курсу физики, М.: Наука, 1990, 397с.