

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

Т. И. Пискарёва, И.Н. Анисина, А.А. Огерчук

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Методические указания

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по программам высшего образования по направлениям подготовки 24.03.04 Авиастроение, 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств, 15.03.01 Машиностроение, 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств, 15.03.06 Мехатроника и робототехника, 24.03.01 Ракетные комплексы и космонавтика, 12.03.04 Биотехнические системы и технологии

Оренбург
2017

УДК 537(076.5)

ББК 22.33я7

ПЗ4

Рецензент – кандидат технических наук А.С. Лелюхин

П 34 Пискарёва, Т. И.

Электричество : методические указания / Т.И. Пискарёва, И.Н. Анисина, А.А. Огерчук. – Оренбургский гос. ун – т. Оренбург : ОГУ, 2017

Методические указания содержат описания лабораторных работ по электричеству. В каждой работе представлены теоретическая часть, опирающаяся на соответствующие рабочим программам темы, экспериментальная часть, контрольные вопросы для самостоятельной проверки полученных знаний, а также приведен список рекомендуемой литературы. Методические указания адресованы бакалаврам, обучающимся по программам высшего образования по направлениям подготовки 24.03.04 Авиационное строительство, 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств, 15.03.01 Машиностроение, 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств, 15.03.06 Мехатроника и робототехника, 24.03.01 Ракетные комплексы и космонавтика, 12.03.04 Биотехнические системы и технологии

УДК 537(076.5)

ББК 22.33я7

© Пискарёва Т.И.,
Анисина И.Н.,
Огерчук А.А., 2017
© ОГУ, 2017

Содержание

1 Лабораторная работа №2а. Измерение сопротивления металлического проводника	4
1.1 Теоретическая часть	4
1.2 Экспериментальная часть	10
1.2.1 Измерение сопротивления проводника с помощью вольтметра и амперметра	10
1.2.2 Измерение сопротивления мостовым методом	12
1.3 Контрольные вопросы	16
2 Лабораторная работа №13а. Определение горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли	17
2.1 Теоретическая часть	17
2.1.1 Магнитное поле, его характеристики. Закон Био-Савара-Лапласа	17
2.1.2 Элементы земного магнетизма	21
2.2 Экспериментальная часть	27
2.2.1 Тангенс-гальванометр	27
2.2.2 Порядок выполнения работы	29
2.3 Контрольные вопросы	32
Список использованных источников	32

1 Лабораторная работа №2а. Измерение сопротивления металлического проводника

Цель работы:

1. Рассмотреть физические основы классической теории электропроводимости металлов.
2. Экспериментально определить сопротивление проводника с помощью мультиметра, методом вольтметра и амперметра.
3. Ознакомиться с мостовым методом измерения сопротивления.
4. Экспериментально определить этим методом зависимость сопротивления однородного проволоочного образца от длины и вычислить удельное сопротивление проводника.

1.1 Теоретическая часть

В 1826 году немецкий физик Г. Ом экспериментально установил прямую пропорциональность между силой тока I , текущего в однородном металлическом проводнике и напряжением U , приложенным к концам проводника

$$I = GU = \frac{U}{R}. \quad (1)$$

Уравнение (1) выражает закон Ома для участка цепи. Коэффициент пропорциональности G называют *электрической проводимостью*. Единица проводимости - *сименс* (См).

Величина, обратная проводимости, называется *электрическим сопротивлением* R . Единицей сопротивления служит 1 Ом, равный сопротивлению такого проводника, в котором при напряжении 1 В течет ток силой 1 А. Сопротивление зависит от геометрических размеров и материала проводника. Сопротивление проводника длиной l с постоянной площадью поперечного сечения S равно

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (2)$$

где ρ - зависящий от свойств материала коэффициент, называемый *удельным сопротивлением вещества*; ρ измеряется в ом-метрах (Ом·м). Удельное сопротивление численно равно сопротивлению кубического проводника с ребром 1 метр, если ток течет перпендикулярно к двум противоположным граням куба. Наименьшим удельным сопротивлением обладают серебро ($1,6 \cdot 10^{-8}$ Ом·м) и медь ($1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м). На практике наряду с медными применяются алюминиевые провода. Хотя алюминий и имеет большее, чем медь, удельное сопротивление ($2,8 \cdot 10^{-8}$ Ом·м), но зато обладает меньшей плотностью по сравнению с медью.

Преобразуем выражение для закона Ома, подставив (2) в (1).

$$I = \frac{U}{R} = \frac{US}{\rho l}. \quad (3)$$

Величина

$$j = \frac{I}{S} \quad (4)$$

называется *плотностью тока* и измеряется в амперах на квадратный метр (А/м²). Плотность тока – векторная величина, за направление j принимается направление упорядоченного движения положительных носителей тока.

Напряженность электрического поля E внутри проводника и напряжение, приложенное к проводнику, связаны соотношением

$$U = E \cdot l \quad (5)$$

С учетом (4) и (5) выражение (3) можно переписать в виде

$$j = \frac{1}{\rho} E$$

Величина, обратная удельному сопротивлению, называется *удельной проводимостью* $\sigma = \frac{1}{\rho}$ и измеряется в См/м. Так как вектор плотности тока и вектор напряженности электрического поля имеют одинаковое направление, то

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}.$$

Эта формула выражает *закон Ома в дифференциальной форме*, связывающий плотность тока в любой точке внутри проводника с напряженностью электрического поля в этой же точке. Это соотношение справедливо и для переменных полей.

Носителями тока в металлах являются свободные электроны, то есть электроны, слабо связанные с ионами кристаллической решетки металла. Это представление о природе носителей тока в металлах основывается на *электронной теории проводимости металлов*, созданной немецким физиком П. Друде и разработанной впоследствии нидерландским физиком Х. Лоренцем, в также на ряде классических опытов, подтверждающих положения электронной теории. Первый из таких опытов – опыт Рикке (1901), в котором в течение года электрический ток пропускался через три последовательно соединенных с тщательно отшлифованными торцами металлических цилиндра (Cu, Al, Cu) одинакового радиуса. Несмотря на то, что общий заряд, прошедший через эти цилиндры, достигал огромных значений ($\approx 3,5 \cdot 10^6$ Кл), никаких, даже микроскопических, следов переноса вещества не обнаружилось. Это явилось экспериментальным доказательством того, что ионы в металлах не участвуют в переносе электричества, а перенос заряда в металлах осуществляется частицами, которые являются общими для всех металлов. Такими частицами могли быть открытые в 1897 г. английским физиком Д. Томсоном *электроны*.

Для доказательства этого предположения необходимо было определить знак и величину *удельного заряда носителей* (отношение заряда носителя к его массе). Идея подобных опытов заключалась в следующем: если в металле имеются подвижные, слабо связанные с решеткой носители тока, то при резком торможении проводника эти частицы должны по инерции смещаться вперед. Результатом смещения зарядов должен быть импульс тока; по направлению тока можно определить знак носителей тока, а зная размеры и сопротивление проводника, можно вычислить удельный заряд носителей. Идея этих опытов (1913) и их качественное воплощение принадлежит российским физикам Л.И. Мандельштаму и Н.Д. Папалекси. Эти опыты в 1916 г. были усовершенствованы и проведены

американским физиком Р. Толменом и ранее шотландским физиком Б. Стюартом. Ими экспериментально доказано, что носители тока в металлах имеют отрицательный заряд, а их удельный заряд приблизительно одинаков для всех исследованных металлов. По значению удельного заряда носителей электрического тока и по определенному ранее Р. Миллиkenом элементарному электрическому заряду была определена их масса. Оказалось, что значения удельного заряда и массы носителей тока и электронов, движущихся в вакууме, совпадали. Таким образом, было окончательно доказано, что носителями электрического тока в металлах являются *свободные электроны*.

Существование свободных электронов в металлах можно объяснить следующим образом: при образовании кристаллической решетки металла (в результате сближения изолированных атомов) валентные электроны, слабо связанные с атомными ядрами, отрываются от атомов металла, становятся «свободными» и могут перемещаться по всему объему. Таким образом, в узлах кристаллической решетки располагаются ионы металла, а между ними хаотически движутся свободные электроны, образуя своеобразный электронный газ, обладающий, согласно электронной теории металлов, свойствами идеального газа.

Электроны проводимости при своем движении сталкиваются с ионами решетки, в результате чего устанавливается термодинамическое равновесие между электронным газом и решеткой. По теории Друде-Лоренца, электроны обладают такой же энергией теплового движения, как и молекулы одноатомного газа. Поэтому, применяя выводы молекулярно-кинетической теории можно найти среднюю скорость теплового движения электронов

$$\bar{u} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}},$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К - постоянная Больцмана,

$m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг - масса электрона,

T - абсолютная температура.

Для комнатной температуры $T \approx 300\text{K}$ и $\bar{u} \approx 10^5$ м/с.

Тепловое движение электронов, являясь хаотическим, не может привести к возникновению тока.

При наложении внешнего электрического поля на металлический проводник кроме теплового движения электронов происходит их упорядоченное движение, то есть возникает электрический ток.

Рассмотрим участок проводника с поперечным сечением S (рисунок 1).

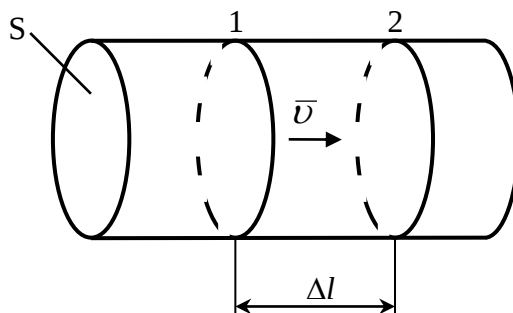


Рисунок 1

В объеме проводника, ограниченном сечениями 1 и 2, содержится $nS\Delta l$ электронов, где n концентрация электронов. Общий заряд электронов равен $q = enS\Delta l$, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона. Если частицы движутся со средней скоростью $\bar{v}$, то за время $\Delta t = \frac{\Delta l}{\bar{v}}$ все частицы, заключенные в рассматриваемом объеме, пройдут через сечение 2. Поэтому сила тока равна:

$$I = \frac{q}{\Delta t} = enS\bar{v}, \quad (6)$$

а плотность тока

$$j = en\bar{v}. \quad (7)$$

Для медного проводника, концентрация электронов в котором $n = 8,5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$, площадью поперечного сечения $S = 10^{-6} \text{ м}^2$ при силе тока $I = 1 \text{ А}$ средняя скорость упорядоченного движения электронов $\bar{v}$ равна $7,8 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$. Следовательно, даже при очень больших плотностях тока средняя скорость теплового движения

электронов во много раз превосходит среднюю скорость их упорядоченного движения, обуславливающего электрический ток.

Пусть в металлическом проводнике существует электрическое поле напряженностью $E = const$. Со стороны поля заряд e испытывает действие силы $F = eE$ и приобретает ускорение $a = \frac{F}{m} = \frac{eE}{m}$, m – масса электрона. Электрон будет двигаться с таким ускорением до тех пор, пока не столкнется с ионом кристаллической решетки, к этому моменту его скорость упорядоченного движения достигнет $v_{\max} = a\tau = \frac{eE}{m}\tau$, τ – время между двумя последовательными соударениями электрона с ионами. Если считать, что скорость теплового движения $\bar{u}$ для всех электронов одинакова, то $\tau = \frac{\lambda}{\bar{u}}$, где λ – средняя длина свободного пробега электрона.

При столкновении электрона с ионами кристаллической решетки, электрон передает иону всю энергию, накопленную им в электрическом поле. При этом скорость упорядоченного движения v электрона падает до нуля (рисунок 2).

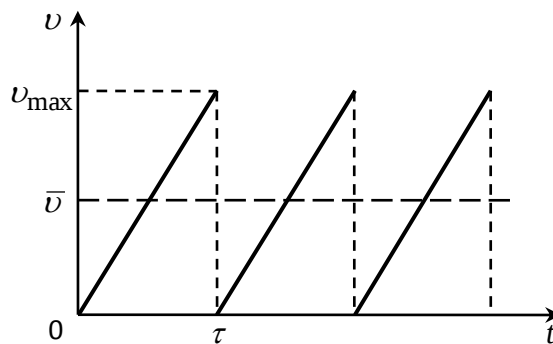


Рисунок 2

Так как скорость v изменяется линейно, то ее среднее за пробег значение равно

$$\bar{v} = \frac{v_{\max} + 0}{2} = \frac{eE\tau}{2m} = \frac{eE\lambda}{2m\bar{u}}. \quad (8)$$

Подставляя (8) в (7), получаем $\vec{j} = \frac{ne^2\lambda}{2m\bar{u}}\vec{E}$ – закон Ома в дифференциальной форме.

Коэффициент пропорциональности между j и E есть удельная проводимость

$$\sigma = \frac{ne^2\lambda}{2m\bar{u}}.$$

Итак, согласно классической теории электрическое сопротивление металлов обусловлено соударением электронов с ионами кристаллической решетки. Данная теория объясняет законы Ома, Джоуля-Ленца и другие закономерности.

Однако, в некоторых вопросах выводы классической электронной теории противоречат опыту: во-первых, согласно данной теории удельное сопротивление равно

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{2m\bar{u}}{ne^2\lambda} = \frac{2m}{ne^2\lambda} \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}},$$

т.е. прямо пропорционально $\sqrt{T}$, а опыт дает, что ρ прямо пропорционально T ; во-вторых, классическая теория не объясняет явление сверхпроводимости. Из теории следует, что удельное сопротивление должно монотонно убывать с уменьшением температуры и обратиться в нуль при $T=0$. А из опыта известно, что для некоторых веществ при определенной температуре, различной для разных веществ, удельное сопротивление скачком уменьшается до нуля; в-третьих, опыт показывает, что электронный газ не дает вклада в теплоемкость металла, хотя согласно теории теплоемкость металлов должна складываться из теплоемкости кристаллической решетки и теплоемкости электронного газа. Объяснение таких несоответствий смогла дать лишь квантовая теория металлов.

1.2 Экспериментальная часть

1.2.1 Измерение сопротивления проводника с помощью вольтметра и амперметра

1. На миниблоке «Удельное сопротивление» установить с помощью отвёртки заданную длину проводника от 0,5 до 2,5 м.

2. Установите миниблок на наборную панель, подключите к нему мультиметр в режиме измерения сопротивления (предел измерения 200 Ом) и запишите значения длины проводника $l = \dots$ м; диаметра $d = \dots$ мм; сопротивления $R = \dots$ Ом.

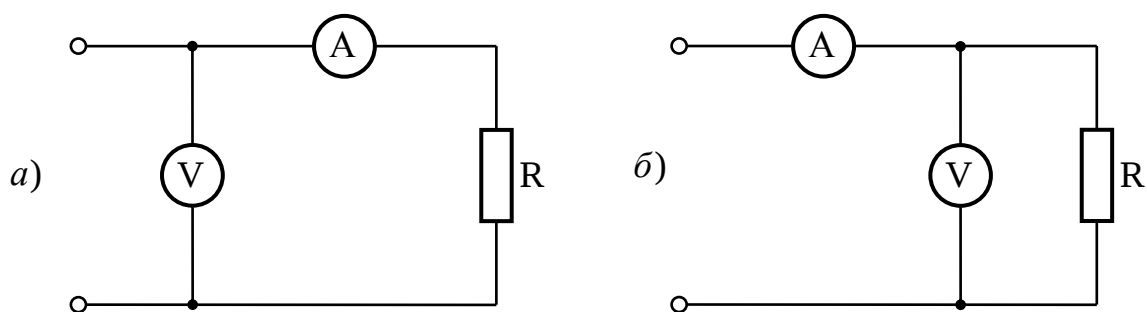


Рисунок 3

3. Соберите цепь для измерения сопротивления методом вольтметра и амперметра как показано на рисунке 4, используя правый мультиметр в качестве вольтметра, а левый в качестве амперметра. Установите на них соответствующие режимы и пределы измерения 20 В и 200 мА. Сплошной линией на рисунке 4 показано включение вольтметра по схеме рисунка 3а, а пунктирной – по схеме рисунка 3б.

4. Включите блок генераторов напряжений и установите регулятором ток в цепи порядка 200 мА. Запишите в таблицу 1 значения тока и напряжения и вычислите сопротивление. Опыт проделайте по двум схемам.

Таблица 1

Схема измерения	Измерения мультиметрами методом вольтметра и амперметра		
	U, В	I, А	R, Ом
Схема (а)			
Схема (б)			

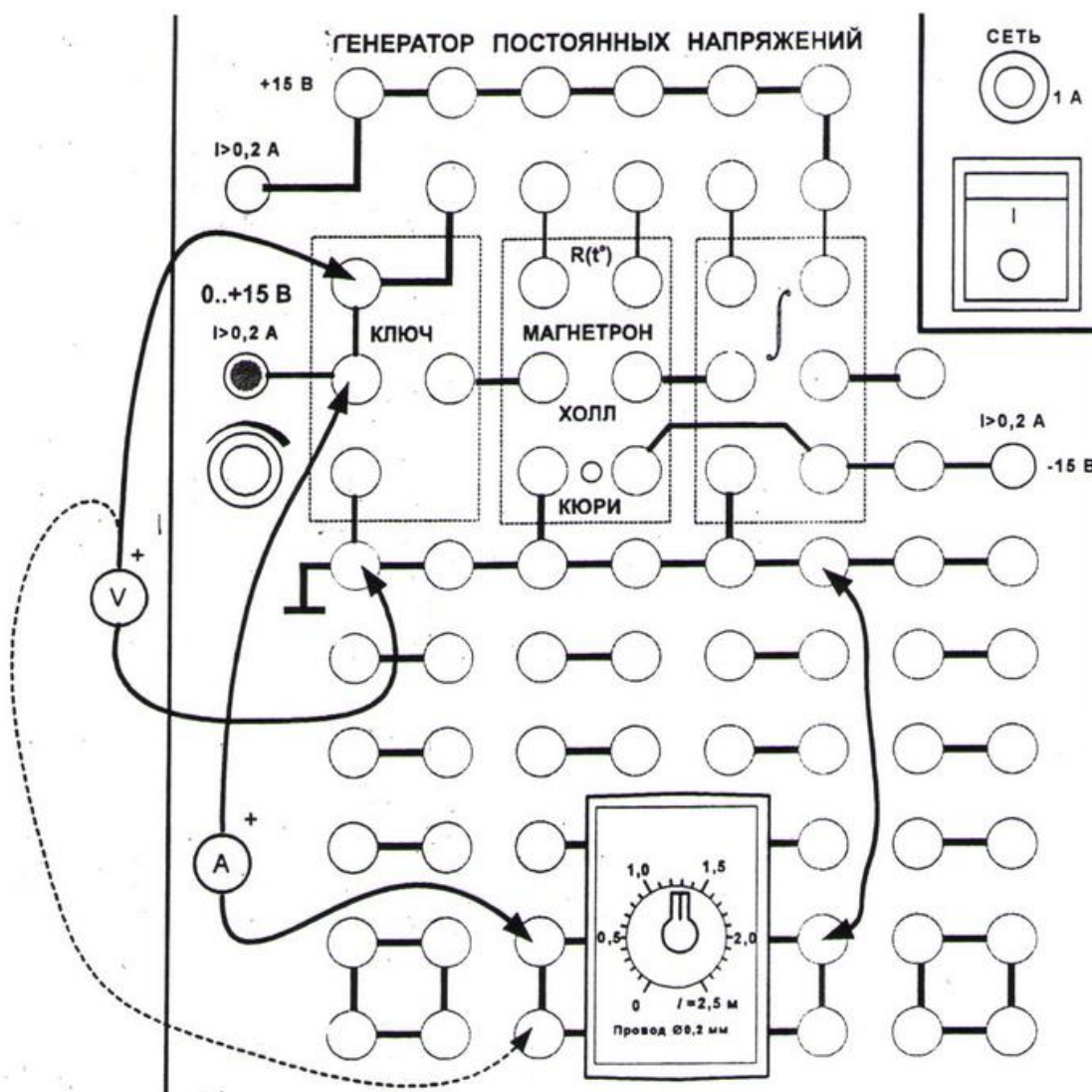


Рисунок 4

1.2.2 Измерение сопротивления мостовым методом

Метод измерения сопротивления с помощью амперметра и вольтметра, рассмотренный в п.1.2.1 имеет невысокую точность ($\pm 1\%$). Большую точность удастся получить в мостовых методах. Рассмотрим наиболее простой вариант схемы мостового метода – *четырёхплечий (одинарный) мост постоянного тока* (рисунок 5).

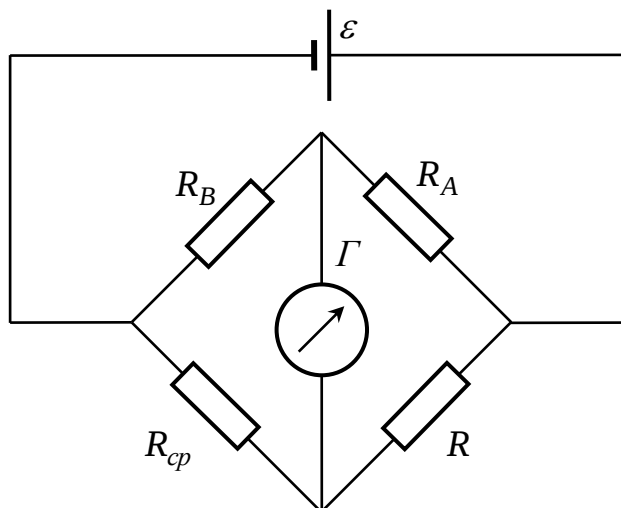


Рисунок 5

Сопротивления R , R_{cp} , R_A , R_B образуют замкнутый четырехугольник (мост) и называются плечами моста.

Здесь R – измеряемое сопротивление, R_{cp} – сопротивление сравнения; оно изготавливается переменным. R_A и R_B образуют плечи отношения и делаются постоянными или ступенчато переменными. В одну диагональ моста включается источник питания ε , в другую гальванометр G . Когда ток в гальванометре равен нулю, то мост уравновешен. Чем чувствительнее гальванометр, тем точнее можно судить о наступлении равновесия.

Пусть I , I_{cp} , I_A , I_B – токи, текущие через R , R_{cp} , R_A , R_B соответственно. В момент равновесия ток через гальванометр равен 0, поэтому через R и R_{cp} проходит один и тот же ток (на гальванометр ток не ответвляется). Одинаковый ток идет по R_A , R_B . Поэтому имеем:

$$I = I_{cp} \quad I_A = I_B \quad (9)$$

Если ток в гальванометре отсутствует, то потенциалы концов гальванометра одинаковы. Поэтому напряжение на R совпадает с напряжением на R_A , а напряжение на R_{cp} , будет равно напряжению на R_B .

$$IR = I_A R_A \quad I_{cp} R_{cp} = I_B R_B \quad (10)$$

Разделив почленно равенства (10) и учтя (9), получим

$$\frac{R}{R_{cp}} = \frac{R_A}{R_B}$$

или

$$R = R_{cp} \frac{R_A}{R_B}.$$

Данное выражение позволяет вычислить сопротивление R . Заметим, что сопротивление плеч моста включает в себя сопротивления соединительных проводов. Поэтому R , R_{cp} , R_A , R_B должны быть велики по сравнению с сопротивлением соединительных проводов. В противном случае приходится вводить дополнительные усложнения в схему.

Для выполнения работы используется мост постоянного тока МО-61, гальванометр МЮ32 и установка ГРМ-01. Измерения выполняются на отрезке провода, натянутого между верхним и нижним кронштейнами установки ГРМ-01. Определяется сопротивление участка провода от зажима нижнего кронштейна до скользящего контакта, установленного на среднем кронштейне. Длина l измеряемого участка провода отсчитывается по миллиметровой шкале против указателя на среднем кронштейне. Перемещением среднего кронштейна вдоль трубчатой стойки устанавливаются различные значения l . Так как сопротивление участка провода может быть от долей до нескольких Ом, то провод подключен к мосту по четырехзажимной схеме (рисунок 6).

Нижний конец подключен к клеммам T_1 и Π_1 , верхний к T_2 , а скользящий контакт к Π_2 . Соединение с клеммами Π_1 , Π_2 сделано калибровочными проводниками 1 и 2 по 0,01 Ом. Сопротивление провода 2 добавляется в сопротивление R_{cp} , а провода 1 в сопротивление R_A . Это учтено в конструкции моста МО-61 так, что не надо вносить дополнительных поправок на сопротивление проводов R_{cp} , R_A , значения которых считываются с панели моста, когда мост

уравновешен. Измерения выполняются для семи значений I , указанных в таблице 1. Все измерения производятся при неизменных значениях $R_A = 10$ Ом и $R_B = 10000$ Ом.

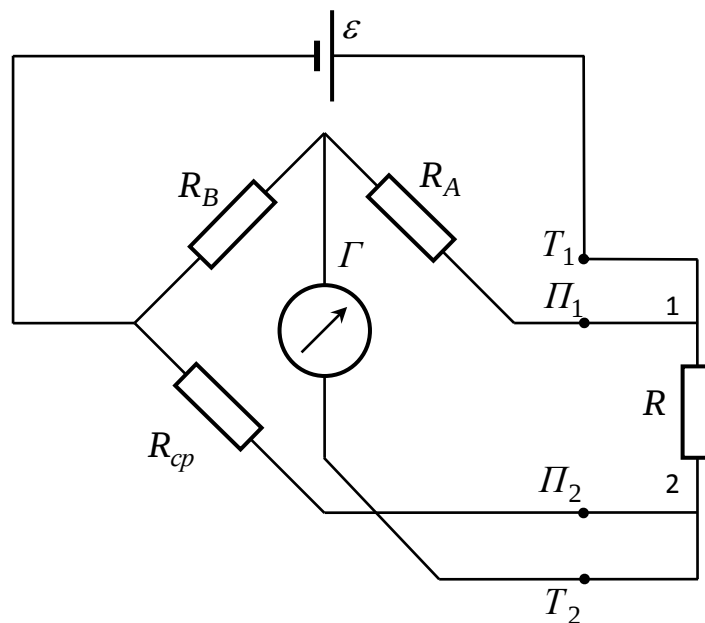


Рисунок 6

Таблица 2

$I, м$	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45
$R_{cp}, Ом$							
$R, Ом$							

По полученным данным постройте график зависимости R от I и вычислите удельное сопротивление материала провода.

1.3 Контрольные вопросы

1. Что называется сопротивлением, проводимостью, удельным сопротивлением и удельной проводимостью? Как вычислить сопротивление однородного проволочного образца?
2. Выведите закон Ома в дифференциальной форме.
3. Расскажите о классической теории электропроводимости металлов.
4. Поясните мостовой метод измерения сопротивления на примере четырехплечего (одинарного) моста.
5. В каком случае нужно пользоваться четырехзажимной схемой подключения? Расскажите о ней.
6. Поясните цель и порядок выполнения работы, прокомментируйте полученные результаты и сделайте вывод.

2 Лабораторная работа №13а. Определение горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли

Цель работы:

1. Познакомиться с элементами земного магнетизма.
2. Изучить магнитное взаимодействие проводников с током.
3. Измерить горизонтальную составляющую напряженности магнитного поля земли на широте г. Оренбурга.

2.1 Теоретическая часть

2.1.1 Магнитное поле, его характеристики. Закон Био-Савара-Лапласа

С современной точки зрения взаимодействие токов обусловлено существованием *магнитного поля*. Этот термин ввел в 1845 г. М. Фарадей. Мы говорим, что ток в одном из проводников создает в окружающем пространстве магнитное поле. В результате возникает сила, действующая на второй проводник в магнитном поле, создаваемом током в первом проводнике. Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле, называется **силой Ампера**.

На основе явления взаимодействия проводников с током введена **единица силы тока**. Один ампер (А) – сила постоянного тока, протекающего по двум тонким и бесконечно длинным проводникам, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м, и вызывающего на каждый метр длины проводников силу взаимодействия $2 \cdot 10^{-7}$ Н.

Таким образом, для нахождения силы взаимодействия между токами надо решить две задачи:

- 1) определить магнитное поле, создаваемое движущимися зарядами, т.е. токами;
- 2) определить силы, действующие со стороны магнитного поля на ток.

Магнитное поле в каждой точке пространства может быть описано вектором магнитной индукции $\vec{B}$. Условились за направление магнитного поля $\vec{B}$ в месте расположения магнитной стрелки принимать направление северного конца стрелки. Для графического изображения магнитного поля часто используют понятие силовых линий. Линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора $\vec{B}$, называют **силовыми линиями** магнитной индукции. Величина магнитной индукции, пропорциональна числу силовых линий, пересекающих единицу площади.

Элементом тока называется произведение силы тока I , протекающего по бесконечно малому отрезку проводника dL , на величину вектора $d\vec{L}$, направленного вдоль тока, т.е. величину $I \cdot d\vec{L}$.

Индукция магнитного поля элемента тока равна:

$$d\vec{B} = k \frac{I[d\vec{L} \cdot \vec{r}]}{r^3} \quad (1)$$

где $\vec{r}$ – радиус-вектор, проведенный из элемента тока в рассматриваемую точку;

k – коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора единиц измерения.

В системе СИ для случая, когда элемент тока находится **в вакууме** или в воздухе, как в данной лабораторной работе, $k = \frac{\mu_0}{4\pi}$, где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная. Поэтому величина магнитной индукции, создаваемой элементом тока, в системе СИ выражается формулой:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot dL \cdot \sin \vartheta}{r^2} \quad (2)$$

где ϑ – угол между $d\vec{L}$ и $\vec{r}$ (рисунок 1). Направление вектора $d\vec{B}$ перпендикулярно к $d\vec{L}$ и $\vec{r}$, т.е. перпендикулярно к плоскости, в которой они лежат. Направление силовой линии магнитной индукции $d\vec{B}$ совпадает с направлением движения буравчика, движущегося поступательно в направлении тока I . Так, например, если ток течет вертикально сверху вниз (рисунок 1), то правый буравчик нужно вращать

по часовой стрелке (глядя сверху); поэтому магнитная индукция в точке a будет направлена от чертежа к читателю, в точке b она направлена противоположно, от читателя за чертеж. Формула (1) носит название **закона Био-Савара-Лапласа**.

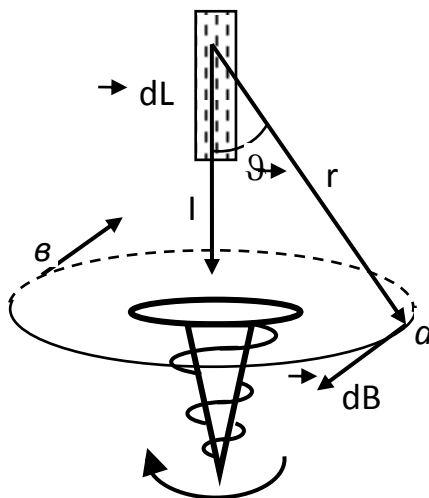


Рисунок 1

Для описания магнитного поля наряду с магнитной индукцией используют *напряженность магнитного поля*. Если $\vec{B}$ – магнитная индукция в какой-либо точке поля в вакууме (в воздухе), то напряженностью магнитного поля в той же точке поля:

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

Для магнитного поля справедлив **принцип суперпозиции**: индукция $\vec{B}$ результирующего магнитного поля есть векторная сумма индукций полей, создаваемых отдельными токами:

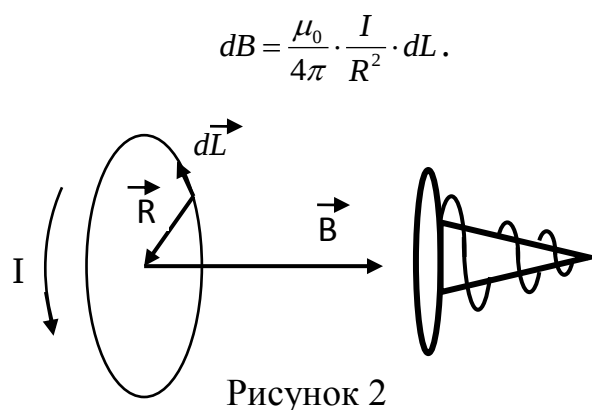
$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3 + \dots = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i \quad (4)$$

Отметим, что справедливость этого принципа заранее не очевидна и в его правильности нас убеждает только опыт. При вычислении индукции магнитного поля в какой-либо точке пространства, создаваемого током в проводнике произвольной формы, суммирование элементарных индукций $d\vec{B}$, определяемых

законом Био-Савара-Лапласа (1), заменяем интегрированием по длине проводника L :

$$\vec{B} = \int d\vec{B} = \int_L \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I[d\vec{L} \cdot \vec{r}]}{r^3}; \quad |\vec{B}| = B = \int_L \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I \cdot dL \cdot \sin \vartheta}{r^2} \quad (5)$$

Найдем индукцию магнитного поля в вакууме **в центре кругового проводника** (рисунок 2). В этом случае все элементы проводника перпендикулярны к радиус-вектору $\vec{R}$ и $\sin \vartheta = 1$. Расстояние всех проводников в центре круга одинаково и равно радиусу круга R . Поэтому (2) дает:



Все элементы тока создают магнитное поле одинакового направления, перпендикулярное к плоскости витка, и поэтому полная индукция поля в центре кругового витка равна:

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi R^2} \int_L dL = \frac{\mu_0 I}{4\pi R^2} \cdot 2\pi R = \frac{\mu_0 I}{2R}. \quad (6)$$

Соответственно, напряженность магнитного поля в центре кругового витка равна:

$$H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{I}{2R}. \quad (7)$$

2.1.2 Элементы земного магнетизма

Характеристикой магнитного поля Земли, как и всякого магнитного поля, служит его напряженность или ее составляющие. Для разложения вектора напряженности на составляющие обычно используют прямоугольную систему координат, в которой ось x ориентируют по направлению географического меридиана (при этом положительным считается направление оси x к северу), ось y – по направлению параллели (положительным считается направление оси y к востоку). Ось z таким образом направлена сверху вниз от точки наблюдения (рисунок 3). Проекция вектора напряженности на ось x носит название северной составляющей H_x , проекция на ось y – восточной составляющей H_y и проекция на ось z – вертикальной составляющей H_z . Эти проекции, как правило, обозначают X , Y , Z , соответственно. Проекцию $\vec{H}$ на горизонтальную плоскость называют горизонтальной составляющей H . Вертикальная плоскость, в которой лежит вектор $\vec{H}$, называется плоскостью магнитного меридиана. В плоскости географического меридиана лежат, очевидно, оси x и z , угол D между плоскостями географического и магнитного меридианов называется магнитным склонением. Угол между горизонтальной плоскостью и вектором $\vec{H}$ носит название магнитного наклона J . Наклонение положительно, когда вектор H направлен вниз, что имеет место в северном полушарии, и отрицательно, когда H направлен вверх, т. е. в южном полушарии.

Склонение D , наклонение J , горизонтальная составляющая H , северная X , восточная Y и вертикальная составляющая Z носят название *элементов земного магнетизма*. Ни один из элементов земного магнетизма не остается постоянным во времени, а непрерывно меняет свою величину от часа к часу и от года к году. Такие изменения получили название вариаций элементов земного магнетизма.

Медленные вариации элементов земного магнетизма получили название вековых. Вековые вариации элементов связаны с источниками, лежащими внутри

земного шара. Быстротечные вариации периодического характера имеют своим источником электрические токи в высоких слоях атмосферы.

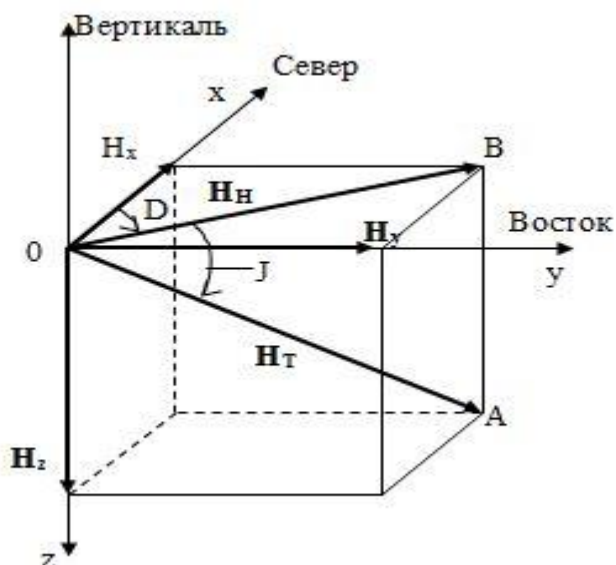


Рисунок 3

Геомагнитное поле подразделяют на три основные части:

- 1) главное магнитное поле и его вековые вариации, имеющие внутренний источник в ядре Земли;
- 2) аномальное поле, обусловленное совокупностью источников в тонком верхнем слое, называемом магнитоактивной оболочкой Земли;
- 3) внешнее поле, связанное с внешними источниками – токовыми системами в околоземном пространстве.

Главное и аномальное поля называют постоянным геомагнитным полем. Поле внешнего происхождения называется переменным электромагнитным полем, поскольку оно является не только магнитным, но и электрическим.

Вклад главного поля составляет в среднем более 95 %, аномальное поле вносит 4 % и доля внешнего поля – менее 1 %.

Теоретическая модель в форме магнита-диполя, помещенная в центр Земли, создает на ее поверхности магнитное поле, которое сравнительно хорошо совпадает с реальным геомагнитным полем.

Однако более точно это поле воспроизводится, если такой «магнит – диполь» повернуть на угол $11,5^\circ$ относительно оси вращения планеты, и еще более точно – при смещении его на 450 км в сторону Тихого океана.

Точки пересечения поверхности земного шара с осью смещенного магнитного диполя называются геомагнитными полюсами.

Координаты геомагнитных полюсов не совпадают, таким образом, с координатами географических полюсов земного шара, и соответственно геомагнитный экватор (линия на поверхности Земли, для всех точек которой наклонение дипольного поля равно нулю) – не совпадает с географическим экватором. Положение магнитных полюсов не является постоянным, а непрерывно меняется.

Вблизи магнитных полюсов вертикальная составляющая принимает максимальное значение, равное примерно **49,75 А/м**, а горизонтальная составляющая в этой области равна нулю.

На магнитном экваторе величина вертикальной составляющей делается равной нулю, а **горизонтальная составляющая** принимает наибольшее значение (**максимальное значение** она принимает вблизи Зондских островов, равное примерно **31,83 А/м**).

Для того чтобы ясно представить себе картину распределения элементов земного магнетизма по поверхности земного шара, пользуются графическим методом изображения – методом построения карт изолиний, т.е. кривых, соединяющих на карте точки с одинаковыми значениями изучаемого параметра магнитного поля.

Магнитные карты строятся как для данной области, так и для целой страны и, наконец, для всего земного шара. В последнем случае они носят название **мировых карт**.

Рассмотрение мировых карт изолиний и карт изолиний отдельных районов приводит к заключению, что магнитное поле на поверхности Земли является суммой нескольких полей, имеющих различные причины, а именно:

- поля, создаваемого однородной намагниченностью земного шара, называемого дипольным (моделируется приведенным выше магнитом-диполем) – H_d ;
- поля, вызываемого внутренними причинами, связанными с неоднородностью глубоких слоев земного шара, получившего название недипольного (его называют также полем мировых аномалий) – H_a ;
- поля, обусловленного намагниченностью верхних частей земной коры – H_b ;
- поля, вызываемого внешними причинами – H_{BH} ;
- поля вариации, причины генерации которого связываются также с источниками, расположенными вне земного шара – H_{BAP} .

Часто сумму полей однородного намагничивания, поля мировых аномалий и внешнего поля $\vec{H} = \vec{H}_d + \vec{H}_a + \vec{H}_b$ называют нормальным полем. Так как оно очень мало и практически им можно пренебречь, то нормальное поле совпадает с главным полем.

Таким образом, если известно распределение нормального поля на поверхности Земли, то можно определить аномальную часть магнитного поля.

Обычно интенсивность нормального поля во много раз больше, чем интенсивность региональных и локальных аномалий. Есть, правда крайне редко, участки земной поверхности, на которых эти аномалии по интенсивности близки к главному магнитному полю Земли. Но и среди этих участков **уникален район Курской магнитной аномалии**, где «возвышаются» десятки магнитных «Эверестов».

Магнитное поле Земли относится к слабым полям, и напряженность ее нормального поля (модуль напряженности) изменяется в зависимости от регионов в широких пределах. Так на полюсах, как уже было отмечено, она достигает 49,5 А/м, в районе Москвы – 39,8 А/м, в районе Комсомольска-на-Амуре – 43,8 А/м. Наибольшего значения на территории нашей страны она достигает в районе Иркутска, Якутии – 48,54 А/м, на Сахалине – 40,59 А/м.

В настоящее время большое внимание уделяют и магнитным вариациям, поскольку помимо научного значения они представляют интерес как явление, оказывающее влияние на практическую деятельность людей и на их здоровье. Так, при возникновении **вариаций значительной амплитуды – магнитных бурь** – нарушается радиосвязь, ухудшается работа многих технических устройств, изменяется скорость протекания физиологических процессов. Например, в июле 1959 г. в результате сильной магнитной бури была прервана радиосвязь между Европой и Америкой, наблюдались нарушения электрической сигнализации на железных дорогах многих стран, вышли из строя даже некоторые электротехнические системы (нарушалась изоляция кабелей и обмоток трансформаторов).

Установлено также, что интенсивные изменения геомагнитного поля не безразличны для животных и растений. Бесспорно влияние вариаций магнитного поля Земли на здоровье людей. Так, когда в одном из городов напряженность магнитного поля возросла на протяжении суток в три раза, смертельные исходы увеличились в 1,8 раза.

Магнитные вариации меняются в разные дни различно. Иногда изменения происходят плавно, подчиняясь определенной закономерности, иногда они имеют беспорядочный характер и тогда периоды, амплитуды и фазы вариаций непрерывно меняют свое значение. В первом случае вариации называются спокойными или невозмущенными, а во втором – возмущенными.

К числу **невозмущенных вариаций** относятся **солнечно-суточные, лунно-суточные и годовые**.

Возмущенная часть вариаций магнитного поля также состоит из целого ряда вариаций, которые, накладываясь одна на другую, в сумме дают неправильные колебания всех элементов земного магнетизма около среднего значения. Некоторые из этих вариаций имеют вполне определенный период, другие меняют свой период от одного колебания к другому. Кроме того, имеются вариации непериодического характера. Поэтому возмущенные вариации классифицируют также на

периодические, непериодические и неправильные флуктуации. К числу периодических относятся возмущенные солнечно-суточные вариации с периодом солнечных суток и короткопериодические колебания, у которых период колеблется от долей секунд до десятков минут. Из непериодических известна вариация под названием аperiодическая возмущенная, которая проявляется во время магнитных бурь главным образом в изменении горизонтальной составляющей. Неправильные флуктуации элементов земного магнетизма представляют основную часть магнитных возмущений.

Магнитные возмущения могут иметь локальный характер и наблюдаться только в ограниченном секторе долгот и широт или же, достигая большой интенсивности, охватывать одновременно всю Землю. В последнем случае их называют магнитными бурями или мировыми бурями.

Принято выделять магнитные бури с внезапным началом и бури с постепенным началом. В первом случае на фоне спокойного хода всех элементов внезапно происходит скачок, отмечаемый в пределах одной-двух минут на всех станциях земного шара.

Бури по интенсивности (по величине амплитуды) принято делить на слабые, умеренные и большие. Под частотой магнитных бурь понимают их количество, приходящееся на тот или иной период времени (год, сезон, сутки). Частота магнитных бурь зависит от многих факторов и, прежде всего, от солнечной активности. В годы максимальной солнечной активности частота бурь наибольшая, а в годы минимальной солнечной активности она опускается до нескольких бурь в год. Кроме этого частота бурь зависит от времени года. Бури чаще возникают в периоды равноденствий.

Следует отметить также одну из основных закономерностей в появлении магнитных бурь, а именно их 27-дневную повторяемость.

В последние годы была также установлена связь магнитных бурь с параметрами солнечного ветра.

2.2 Экспериментальная часть

2.2.1 Тангенс-гальванометр

Тангенс-гальванометр представляет собой плоскую вертикальную катушку радиуса r с некоторым числом витков n . В центре катушки находится магнитная стрелка (компас), вращающаяся вокруг вертикальной оси. Магнитная стрелка компаса при отсутствии тока в катушке будет расположена по магнитному меридиану Земли NS (рисунок 4).

Поворачивая катушку около вертикальной оси, можно добиться совмещения плоскости катушки с плоскостью магнитного меридиана. Если по катушке пропустить ток I , то возникает магнитное поле с напряженностью H , направленное перпендикулярно к плоскости катушки. Таким образом, на магнитную стрелку будут действовать два взаимно перпендикулярных магнитных поля: магнитное поле Земли и магнитное поле тока.



Рисунок 4

Напряженности обоих полей взаимно перпендикулярны. $\vec{H}$ – вектор напряженности поля, созданного круговым током, $\vec{H}_{\text{гор}}$ – горизонтальная

составляющая напряженности магнитного поля Земли. Стрелка устанавливается по направлению равнодействующей $\vec{H}_1$, т.е. по диагонали параллелограмма, сторонами которого будут вектор напряженности магнитного поля кругового тока $\vec{H}$ и $\vec{H}_{гор}$.

$H = H_{гор} \cdot \operatorname{tg} \alpha$ (рисунок 5).

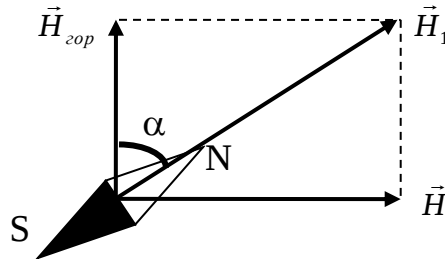


Рисунок 5

С другой стороны, напряженность магнитного поля в центре катушки вычисляется по формуле (8) с учетом числа витков n :

$$H = \frac{nI}{2r} \quad (8)$$

Тогда

$$\frac{nI}{2r} = H_{гор} \cdot \operatorname{tg} \alpha,$$

откуда

$$H_{гор} = \frac{nI}{2 \cdot r \cdot \operatorname{tg} \alpha}. \quad (9)$$

Горизонтальная составляющая индукции $B_{гор}$ магнитного поля земли в соответствии с (3) вычисляется по формуле:

$$B_{гор} = \mu_0 \cdot H_{гор} = \mu_0 \cdot \frac{nI}{2 \cdot r \cdot \operatorname{tg} \alpha}. \quad (10)$$

Формулами (9) и (10) пользуются для опытного определения $H_{гор}$ и $B_{гор}$.

2.2.2 Порядок выполнения работы

1. Соберите электрическую цепь из тангенс-гальванометра ТГ, амперметра А, реостата R, ключа-переключателя П, источника постоянного тока Б типа АГАТ (рисунок 6).
2. Поворачивая подставку тангенс-гальванометра и компаса, установите плоскость катушки тангенс-гальванометра в плоскости магнитного меридиана так, чтобы один конец магнитной стрелки компаса совпадал с нулем.
3. Установите подставку тангенс-гальванометра в горизонтальное положение и, соответственно, катушку тангенс-гальванометра в вертикальной плоскости магнитного меридиана, используя регулировочные винты на подставке.

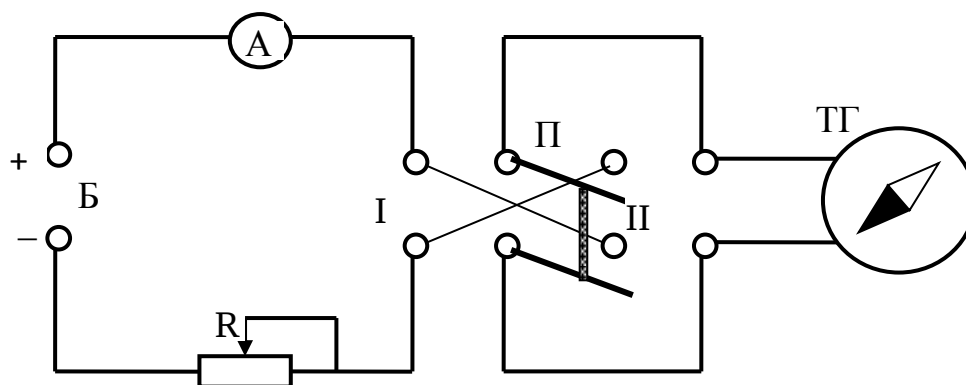


Рисунок 6

4. Поставьте переключатель П в разомкнутое положение; полностью введите сопротивление реостата R; подключите АГАТ к сети ~220В; переключите тумблер «сеть - аккумулятор» на лицевой панели АГАТа в положение «сеть».
5. Включите переключатель П в положение I. Перемещением ползунка реостата R установите определенную силу тока $\bar{I}$ в катушке тангенс-гальванометра. Значение силы тока $\bar{I}$ задается преподавателем и может лежать в интервале 0,15 А - 0,25 А.
6. При заданной силе тока определите пять раз углы отклонения магнитной стрелки $\alpha_{I,i}$ и $\alpha_{II,i}$, переключая каждый раз переключатель П из положения I в II и обратно (i пробегает значения от 1 до 5 и означает номер измерения угла отклонения, когда переключатель в положении I или II; $\alpha_{I,i}$ – абсолютное значение угла отклонения,

когда переключатель II в положении I, $\alpha_{II,i}$ – когда переключатель II в положении II. Результаты измерений занесите в таблицу.

7. Выполните обработку результатов прямых измерений.

а) Вычислите средний угол отклонения магнитной стрелки $\bar{\alpha}$:

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_{I,1} + \alpha_{I,2} + \alpha_{I,3} + \alpha_{I,4} + \alpha_{I,5} + \alpha_{II,1} + \alpha_{II,2} + \alpha_{II,3} + \alpha_{II,4} + \alpha_{II,5}}{10}; \quad (11)$$

б) Найдите стандартную ошибку σ угла отклонения магнитной стрелки:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{\text{пр}}^2 + \frac{(\alpha_{I,1} - \bar{\alpha})^2 + \dots + (\alpha_{I,5} - \bar{\alpha})^2 + (\alpha_{II,1} - \bar{\alpha})^2 + \dots + (\alpha_{II,5} - \bar{\alpha})^2}{9 \cdot 10}}, \quad (12)$$

где $\sigma_{\text{пр}} = 0,2$ град. – приборная ошибка шкалы отсчета угла отклонения магнитной стрелки компаса.

Таблица 1

$\alpha_{I,i}$, град					
$\alpha_{II,i}$, град					
$\bar{\alpha} = \dots$ град,		$\sigma = \dots$ град,		$\Delta\alpha = 3\sigma = \dots$ град,	
$\bar{I} = \dots$ А,		$\Delta I = \dots$ А,			
$r = \bar{r} \pm \Delta r = (0,13 \pm 0,005)$ м,				$n = 9$	

в) Определите ошибку измерения угла отклонения, как $\Delta\alpha = 3\sigma$. При этом доверительная вероятность составляет около 99%.

г) Определите ошибку измерения силы тока I , как

$$\Delta I = \gamma \frac{I_B}{200}, \quad (13)$$

где γ – класс точности амперметра (приведенная относительная погрешность амперметра в процентах),

I_B – верхний предел измерения амперметра.

Результаты расчетов занесите в таблицу.

8. По формулам (9) и (10) $\bar{H}_{\text{гор}} = \frac{n\bar{I}}{2 \cdot r \cdot \operatorname{tg} \alpha}$, $\bar{B}_{\text{гор}} = \mu_0 \cdot \frac{n\bar{I}}{2 \cdot r \cdot \operatorname{tg} \alpha}$ вычислите средние значения горизонтальных составляющих напряженности $\bar{H}_{\text{гор}}$ и индукции $\bar{B}_{\text{гор}}$ магнитного поля Земли, подставляя в приведенные формулы значения $n = 9$, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м и средние значения $\bar{\alpha}$, $\bar{I}$ и $\bar{r} = 0,13$ м – радиуса витка катушки. Затем рассчитайте ошибки $H_{\text{гор}}$ и $B_{\text{гор}}$:

$$\Delta H_{\text{гор}} = \varepsilon \cdot \bar{H}_{\text{гор}} \text{ и } \Delta B_{\text{гор}} = \varepsilon \cdot \bar{B}_{\text{гор}}, \quad (14)$$

где

$$\varepsilon = \frac{1}{\bar{H}} \sqrt{\left(\frac{\partial H}{\partial I} \cdot \Delta I\right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial r} \cdot \Delta r\right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial \alpha} \cdot \Delta \alpha\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{\Delta I}{\bar{I}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta r}{\bar{r}}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot \delta \cdot \Delta \alpha}{\sin(2\bar{\alpha})}\right)^2}. \quad (15)$$

Здесь $\delta = \frac{\pi}{180} \approx 1,75 \cdot 10^{-2}$ рад/град – коэффициент перехода от градусов к радианам.

9. Запишите окончательный результат в виде:

$$H_{\text{гор}} = \bar{H}_{\text{гор}} \pm \Delta H = \dots \frac{\text{А}}{\text{м}},$$

$$B_{\text{гор}} = \bar{B}_{\text{гор}} \pm \Delta B = \dots \text{Тл},$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{\bar{H}_{\text{гор}}} \cdot 100\% = \frac{\Delta B}{\bar{B}_{\text{гор}}} \cdot 100\% = \dots\%.$$

10. Сделайте выводы по результатам выполненной работы.

2.3 Контрольные вопросы

1. Каковы характеристики магнитного поля?
2. Сформулируйте закон Био-Савара-Лапласа. Как определить направление вектора индукции $d\vec{B}$, создаваемой элементом тока в какой-либо точке пространства?
3. Чему равна напряженность магнитного поля в центре кругового тока? Как ее рассчитать?
4. Определите элементы земного магнетизма.
5. Объясните устройство и принцип действия тангенс-гальванометра.
6. Почему следует ориентировать катушку тангенс-гальванометра в направлении магнитного меридиана?

Список использованных источников

- 1 Трофимова, Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова. – М.: Высшая школа, 2004. – 544 с., 2005, 2006, 2007.
- 2 Савельев, И.В. Курс общей физики: учебное пособие для вузов в 5 кн. Кн. 1, кн. 2, кн. 3, кн. 4, кн. 5. / И.В. Савельев. – М.: Астрель, АСТ, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007.
- 3 Детлаф, А.А. Курс физики / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – М.: Высшая школа, 2000. – 718 с., 2005.
- 4 Летута, С. Н. Введение в физику : учеб. пособие / С. Н. Летута, А. А. Чакак; М-во образования и науки Рос. Федерации, Гос. образоват. учреждение высш. проф. образования "Оренбург. гос. ун-т". – Оренбург : ИПК ГОУ ОГУ, 2011. – 501 с.
- 5 Чакак, А.А. Курс физики. Электричество и магнетизм / А.А. Чакак. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2006, – 317 с. Электронный каталог ОГУ. – Режим доступа : http://artlib.osu.ru/web/books/metod_all/1121_20110805.pdf.

6 Калашников, С. Г. Электричество : учеб. пособие для физ. спец. вузов / С. Г. Калашников. – 5-е изд., испр. и доп. – М. : Наука, 1985. – 576 с.

7 Степанов, А.Н. Электромагнитная безопасность : учеб. пособие / А. Н. Степанов, И.П. Степанова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2013. – 350 с.