

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

Факультет специальных технологий
Кафедра «Физика»

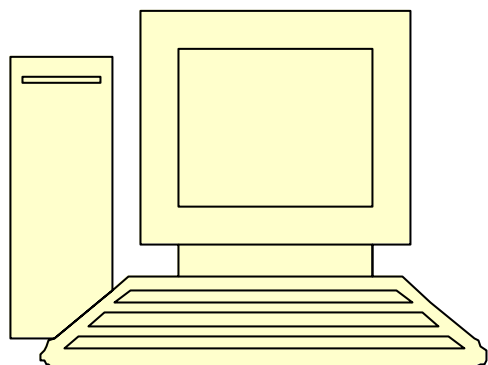


ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ФИЗИКЕ

ЧАСТЬ II. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

Учебное пособие и методические указания по выполнению лабораторных работ
для студентов всех форм обучения

(для рабочей тетради № 1)



Студент _____

Группа _____

Факультет _____

Преподаватель _____

УДК: 537.7 (075.5)

Лабораторные работы по физике. Часть II. Электричество и магнетизм. Методические указания по выполнению лабораторных работ для студентов очной и очно-заочной формы обучения. / Разработали и составили: Кустов С.Л., Романенко В.В., Черных Е.В., Гурова Н.М. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ. - 2018. – 24 с.

Методические указания предназначены для выполнения лабораторных работ по курсу физики. Содержат теоретические основы и описание установок к лабораторным работам.

Рассмотрены и одобрены на заседании кафедры «Физика». Протокол № 1 от 31 августа 2015 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 1.	Изучение закона Ома. Определение удельного сопротивления проводника	4
Лабораторная работа № 23.	Определение ЭДС методом компенсации	6
Лабораторная работа № 36.	Определение емкости конденсатора баллистическим гальванометром	8
Лабораторная работа № 37.	Изучение термоэлектронной эмиссии и определение работы выхода электрона из металла	10
Лабораторная работа № 26.	Определение индукции магнитного поля на оси кругового тока	12
Лабораторная работа № 31.	Силы в магнитном поле. Измерение индукции магнитного поля электродинамометром	14
Лабораторная работа № 38.	Исследование магнитного поля на оси соленоида	17
Лабораторная работа № 39.	Определение кривой намагничивания железа	18
Лабораторная работа № 42.	Определение удельного заряда электрона	21
Обработка результатов измерений		23
Рекомендуемая литература		30

МАРШРУТНАЯ КАРТА

№ звена	НОМЕР РАБОТЫ					
	1	2	3	4	5	6
1	1	23	36	26	31	39
2	1	23	37	26	38	42
3	1	36	23	31	26	38
4	1	36	37	38	26	31
5	1	37	23	39	31	26
6	1	23	36	42	39	26
7	1	37	23	26	42	31

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНА ОМА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКА

Цель работы: изучить зависимость напряжения на концах проводника от его длины при постоянной силе тока, проходящей через проводник, и зависимость между силой тока и напряжением в проводнике. Определить удельное сопротивление проводника.

Приборы и оборудование: установка FPM-01, микрометр.

Теоретическое введение. *Электрическим током* называется упорядоченное движение заряженных частиц. За *направление* тока принимают направление движения *положительных зарядов*. Носителями электрического тока в металлах являются «свободные» электроны, которые могут упорядоченно перемещаться по объему металла под действием сколь угодно малых сил, действующих со стороны электрического поля. Количественной характеристикой электрического тока является сила тока. *Сила тока* – скалярная физическая величина, определяющая величину электрического заряда, проходящего через поперечное сечение проводника в единицу времени

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

Электрический ток называется *постоянным*, если сила тока и его направление не изменяется с течением времени.

Для постоянного тока $I = \frac{q}{t}$. Единица силы тока – **ампер (А)**.

Плотностью электрического тока называется вектор $\vec{j}$, совпадающий с направлением электрического тока в рассматриваемой точке и численно равный отношению силы тока I сквозь малый элемент поверхности, перпендикулярный направлению тока, к площади этого элемента:

$$\vec{j} = \frac{dI}{dS} \vec{n} \quad (2).$$

где $\vec{n}$ – единичный вектор нормали к сечению проводника. Для постоянного тока I , текущего перпендикулярно сечению S проводника:

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

Единица плотности тока – **ампер на квадратный метр (А/м²)**.

Экспериментально установлено, что сила тока I , текущего по однородному металлическому проводнику, пропорциональна напряжению U , приложенному к проводнику:

$$I = \frac{1}{R} \cdot U \quad (4),$$

где *напряжение* U – разность потенциалов на концах проводника. Единица напряжения – **вольт (В)**. Коэффициент пропорциональности R , входящий в формулу (4), называется *электрическим сопротивлением* проводника. Единица электрического сопротивления – **ом (Ом)**: 1 Ом – сопротивление такого проводника, в котором при напряжении 1 В протекает постоянный ток 1 А. Сопротивление возникает вследствие того, что кристаллическая решетка проводника препятствует движению зарядов. Выражение (4) представляет собой **закон Ома для однородного участка цепи** (не содержащего источника тока) **в интегральной форме**.

Величина, обратная электрическому сопротивлению $G = \frac{1}{R}$, называется *электрической проводимостью* проводника. Единица измерения электрической проводимости – **сименс (См)**: 1 См – проводимость участка электрической цепи сопротивлением 1 Ом.

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

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

где коэффициент пропорциональности ρ называется *удельным электрическим сопротивлением* проводника. Удельное сопротивление зависит только от материала, из которого изготовлен проводник и температуры. **Физический смысл удельного сопротивления** состоит в том, что оно представляет собой сопротивление однородного проводника площадью поперечного сечения 1 м² и длиной 1 м:

$$\rho = R \cdot \frac{S}{l} \quad (6).$$

Единица измерения удельного сопротивления в системе СИ – **ом-метр (Ом·м)**. Наименьшим удельным сопротивлением обладают серебро – $1,6 \cdot 10^{-8}$ Ом·м и медь – $1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

Величина, обратная удельному сопротивлению, называется *удельной электрической проводимостью* проводника:

$\gamma = \frac{1}{\rho}$. Единица удельной электрической проводимости – **сименс на метр** (См/м).

Сопротивление металлов обусловлено дефектами решетки и тепловыми колебаниями ионов. С увеличением температуры увеличивается амплитуда колебаний ионов в кристаллической решетке. Поэтому сопротивление металлов возрастает при нагревании. Опытным путем установлено, что для большинства случаев изменение удельного сопротивления (а значит и сопротивления) с температурой описывается линейным законом:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t) \quad \text{или} \quad R = R_0(1 + \alpha t) \quad (7).$$

где ρ и ρ_0 , R и R_0 – соответственно удельные сопротивления и сопротивления проводника при температурах t и 0°C , α – температурный коэффициент сопротивления.

Сопротивление многих металлов при очень низких температурах T_k (0,4-20 К) называемых **критическими**, характерных для каждого вещества, скачкообразно уменьшается до нуля, и металл становится абсолютным проводником (рис. 1). Это явление называется **сверхпроводимостью**.

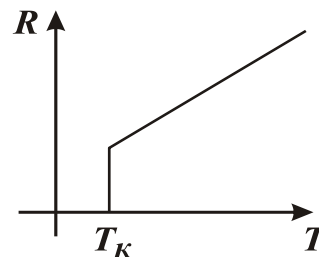


Рис. 1. Зависимость сопротивления от температуры

В проводнике длиной l напряженность электрического поля $E = \frac{U}{l}$, сопротивление $R = \rho \cdot \frac{l}{S}$, плотность электрического тока $j = \frac{I}{S}$. Отсюда, используя соотношение (4) получим:

$$j = \frac{I}{S} = \frac{U}{R} \cdot \frac{1}{S} = \frac{U}{\frac{\rho \cdot l}{S} \cdot S} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{U}{l} = \gamma \cdot E \quad (8).$$

В векторной форме соотношение (8) имеет вид

$$\vec{j} = \gamma \cdot \vec{E} \quad (9).$$

Соотношение (9) – **закон Ома в дифференциальной форме**. Этот закон связывает плотность тока в любой точке внутри проводника с напряженностью электрического поля в этой же точке.

Для измерения удельного сопротивления проводника необходимо определить его сопротивление и геометрические размеры. Сопротивление R определяют из закона Ома:

$$R = \frac{U}{I} \quad (10).$$

Делая соответствующую замену в (6), получим

$$\rho = \frac{U}{I} \cdot \frac{S}{l} \quad (11).$$

Для проводника круглого сечения с диаметром d площадь сечения равна $S = \frac{\pi}{4} \cdot d^2$, тогда

$$\rho = \frac{U}{I} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \frac{d^2}{l} \quad (12),$$

$$\text{отсюда} \quad U = \frac{4 \cdot \rho \cdot l}{\pi \cdot d^2} \cdot I \quad (13).$$

Из соотношения (13) видно, что для экспериментального доказательства справедливости закона Ома необходимо проверить две зависимости: зависимость $U(I)$ при постоянной силе тока I , и зависимость $U(l)$ при постоянной длине l проводника. Согласно выражению (13) данные зависимости должны быть линейными.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Для измерений собирается схема, приведенная на рисунке 2. Резистор R_1 служит для изменения силы тока в цепи. В качестве сопротивления R используется никелиновая или константановая проволока. С помощью штатива можно регулировать длину участка проволоки, с которого снимается напряжение. Значения силы тока и напряжения снимаются по шкалам приборов. При расчетах и измерениях следует учесть, что сопротивление амперметра пренебрежимо мало по сравнению с сопротивлением вольтметра и проволоки, а сопротивление проволоки пренебрежимо мало по сравнению с сопротивлением вольтметра.

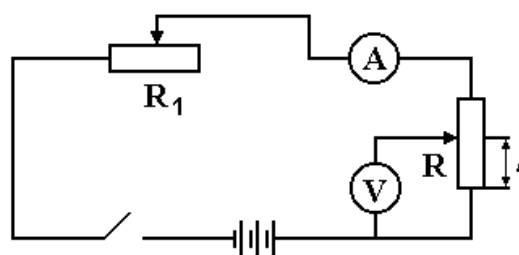


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сформулировать закон Ома для однородного участка цепи в интегральной и дифференциальной формах.
2. Что такое сила тока, плотность электрического тока, напряжение?
3. Что такое сопротивление проводника, проводимость проводника?
4. Что называется удельным сопротивлением проводника, от чего оно зависит?
5. Какова зависимость сопротивления металлов от температуры? Что такое сверхпроводимость?
6. Показать, что сила тока в цепи на рисунке 2 почти не зависит от длины проводника, с которой снимается напряжение.
7. Каково должно быть соотношение между сопротивлением амперметра R_A , вольтметра R_V и исследуемым сопротивлением R , чтобы свести ошибку в определении сопротивления R , а следовательно и удельного сопротивления ρ , до минимума.
8. Записать функциональную зависимость между падением напряжения на однородном участке проводника и его длиной.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 23

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩИХ СИЛ МЕТОДОМ КОМПЕНСАЦИИ

Цель работы: ознакомиться с понятием сторонних электродвижущих сил и методом их измерения, измерить ЭДС нескольких источников.

Приборы и оборудование: источники тока, реохорд, гальванометр.

Теоретическое введение. Для возникновения и существования электрического тока необходимо:

1. Наличие **свободных носителей тока** – заряженных частиц, способных перемещаться упорядоченно;
2. Наличие **разности потенциалов** между концами проводника.

Известно, что положительные заряды в электрической цепи перетекают из точек с высоким потенциалом в точки с более низким потенциалом, подобно жидкости в поле силы тяжести. Однако, вследствие изменения количества заряда в указанных точках, их потенциалы выравниваются, ток прекращается. Для получения стационарного процесса, то есть тока, неизменного по величине, необходимо постоянно восполнять утечку заряда в точке с высоким потенциалом и устранять накопление его в точке с низким потенциалом. Эту функцию выполняет так называемый **источник тока**, подсоединенный к указанным точкам и вызывающий обратный переток положительных зарядов из точки с низким потенциалом в точку с высоким потенциалом, против сил электрического поля. Движение зарядов против сил электрического поля обеспечивается **сторонними силами**, то есть силами неэлектростатического происхождения. Примерами сторонних сил могут быть силы вихревого магнитного поля, возникающие в генераторе, электрохимические силы в гальваническом элементе, силы трения, приводящие к электризации диэлектриков и другие.

Количественной мерой сторонних сил служит **электродвижущая сила (ЭДС)** – величина, равная отношению работы по перемещению заряда от одного полюса источника тока к другому к величине этого заряда

$$\mathcal{E} = \frac{A}{q} \quad (1).$$

Из соотношения (1) видно, что ЭДС, как и потенциал, измеряется в вольтах (В).

На практике для измерения ЭДС чаще всего пользуются вольтметром. Для этого собирается простейшая схема (рис. 1). Источник тока обладает ЭДС равной $\mathcal{E}$ и внутренним сопротивлением r , сопротивление вольтметра – R . При замыкании цепи в ней возникает электрический ток силой I . Применим закон Ома для замкнутой цепи:

$$I \cdot r + I \cdot R = \mathcal{E} \quad (2).$$

Показание вольтметра U равно падению напряжения на нем: $U = I \cdot R$. Выразив показания вольтметра из (2), получим

$$U = \mathcal{E} - I \cdot r = \frac{\mathcal{E} \cdot R}{R + r} \quad (3).$$

Полученное соотношение показывает, что показания вольтметра всегда меньше ЭДС источника. Кроме того, значения, получаемые при использовании различных вольтметров, могут отличаться из-за различия их сопротивлений R , а также из-за зависимости внутреннего сопротивления от силы тока (внутреннее сопротивление гальванического элемента возрастает по мере его разрядки). Из соотношения (3) следует, что истинное значение ЭДС можно получить, если обеспечить равенство нулю тока, протекающего через источник. Это достигается в компенсационных схемах измерений. Один из видов компенсационной схемы изображен на рисунке 2. В этой схеме источник тока с измеряемой ЭДС $\mathcal{E}$ и вспомогательный источник – «батарея» с ЭДС $\mathcal{E}_B$ – включены навстречу друг другу. Реохорд АС – проволока с высоким удельным сопротивлением, натянутая на деревянный брусок. Точка В соответствует положению подвижного контакта – щупа на реохорде и выбирается таким образом, чтобы ток через гальванометр был равен нулю.

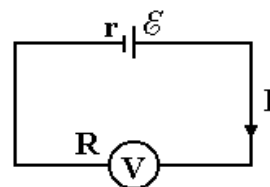


Рис. 1. Простейшая схема для определения ЭДС

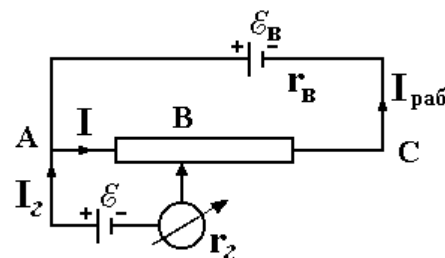


Рис. 2. Компенсационная схема

Сопротивление R реохорда AC складывается из сопротивлений участков AB и BC : $R=R_{AB} + R_{BC}$.

Для расчета цепи постоянного тока применим **правила Кирхгофа**.

Первое правило: алгебраическая сумма токов, сходящихся в любой точке разветвленной цепи, равна нулю:

$$\sum_k I_k = 0 \quad (4).$$

Токи учитываются со знаком «+», если они приходят в рассматриваемую точку и со знаком «-», если они уходят из этой точки. Обычно первое правило Кирхгофа применяется к узловым точкам цепи, в которых сходятся три и более токов. Первое правило вытекает из закона сохранения электрического заряда.

Второе правило: если несколько участков электрической цепи образуют замкнутый контур, то сумма падений напряжений на всех участках этого контура равна сумме ЭДС, действующих в этом контуре:

$$\sum_k I_k R_k = \sum_i \mathcal{E}_i \quad (5).$$

Падение напряжения $I \cdot R$ считается положительным, если выбранное направление тока на данном участке контура совпадает с направлением обхода контура и отрицательным, если направление тока и обхода противоположны. ЭДС $\mathcal{E}$ имеет положительное значение, если при обходе контура внутри элемента переходим от «-» полюса источника к «+», и отрицательное, если наоборот.

Применим правила Кирхгофа к узлу A и к двум контурам $ABCBA$ и $ABCA$ на схеме рисунка 2.

$$\begin{aligned} I_z + I_{pa6} - I &= 0 \\ I \cdot R_{AB} + I_{pa6} \cdot (R_{BC} + r_B) &= \mathcal{E}_B \\ I \cdot R_{AB} + I_z \cdot (r + r_z) &= \mathcal{E} \end{aligned} \quad (6).$$

В случае уравновешенной схемы сила тока через гальванометр равна нулю - $I_z=0$, и уравнения системы (6) упрощаются :

$$\begin{aligned} I_{pa6} &= I \\ I \cdot (R_{AB} + R_{BC} + r_B) &= \mathcal{E}_B \\ I \cdot R_{AB} &= \mathcal{E} \end{aligned} \quad (7),$$

Отсюда

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_B \cdot \frac{R_{AB}}{R + r_B} \quad (8).$$

Из соотношения (8) следует, что неизвестную ЭДС можно определить, если уравновесить схему, содержащую эту ЭДС и измерить R_{AB} . Остальные величины - постоянные для данной установки. Однако величина r_B трудно измерима и к тому же меняется во время эксплуатации батареи. Чтобы избежать это затруднение поступим следующим образом: установим в схему источник с известной ЭДС (эталонный источник $\mathcal{E}_{эм}$) и после уравновешивания схемы определим сопротивление участка AB реохорда $R_{ABз}$. Затем установим на его место источник с неизвестной ЭДС - $\mathcal{E}_x$. Полученное в результате аналогичных действий сопротивление участка AB реохорда обозначим $R_{ABх}$. Применим к обоим измерениям соотношение (8)

$$\mathcal{E}_{эм} = \mathcal{E}_B \cdot \frac{R_{ABз}}{R + r_B}, \quad \mathcal{E}_x = \mathcal{E}_B \cdot \frac{R_{ABх}}{R + r_B} \quad (9).$$

Поделив эти соотношения друг на друга, получим

$$\mathcal{E}_x = \mathcal{E}_{эм} \cdot \frac{R_{ABх}}{R_{ABз}} \quad (10).$$

Для того чтобы сокращение величин $\mathcal{E}_B$ и $R+r_B$ было правомерным, необходимо, чтобы они не изменялись при проведении измерений, то есть, были стабильны. Кроме того, необходимо, чтобы точка B , соответствующая положению щупа в уравновешенной схеме, располагалась между точками A и C реохорда. А это, в свою очередь, требует выполнения условий: $\mathcal{E}_B > \mathcal{E}_{эм}$ и $\mathcal{E}_B > \mathcal{E}_x$. Точность же измерений зависит от точности, с которой определены $\mathcal{E}_{эм}$, $R_{ABх}$, $R_{ABз}$.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Экспериментальная установка отличается от рассматриваемой выше тем, что имеется разъемное соединение для подключения различных ЭДС (рис. 3). После включения установки передвигают контакт **В** до установления стрелки гальванометра **Г** на нуль. Схема при этом оказывается уравновешенной. Так как реохорд представлен однородной проволокой, то сопротивления R_{ABx} и R_{ABz} пропорциональны длинам этих участков l_{ABx} и l_{ABz} . Из соотношения (10) легко получить формулу для определения ЭДС

$$\mathcal{E}_x = \mathcal{E}_{эт} \cdot \frac{l_{ABx}}{l_{ABz}} \quad (11).$$

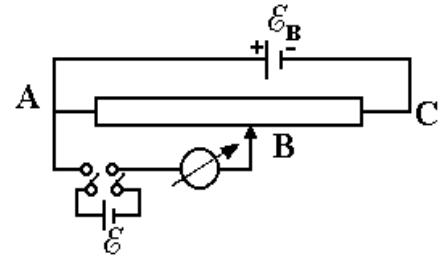


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Указать условия, необходимые для поддержания тока в цепи.
2. Что такое сторонние силы? Что такое ЭДС элемента? Единицы измерения ЭДС.
3. Записать закон Ома для замкнутой цепи.
4. Почему применение схемы на рисунке 1 для измерения ЭДС не всегда дает правильные результаты?
5. Сформулировать и записать правила Кирхгофа.
6. Пояснить сущность метода компенсации.
7. Какие требования должны быть предъявлены к ЭДС батареи и эталонной ЭДС?
8. Вывести формулу (11).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 36

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРА БАЛЛИСТИЧЕСКИМ ГАЛЬВАНОМЕТРОМ

Цель работы: ознакомиться с понятием электрической емкости и методом ее измерения. Измерить емкости конденсаторов. Проверить справедливость формул результирующей емкости при последовательном и параллельном соединениях конденсаторов.

Приборы и оборудование: конденсаторы, источник тока, баллистический гальванометр, вольтметр, потенциометр, соединительные провода.

Теоретическое введение. Если проводнику сообщить заряд q , то его потенциал оказывается равным ϕ . На сколько возрастает потенциал тела при сообщении ему одного и того же заряда, зависит от формы, размеров тела, а также от окружающих его тел. Потенциал проводника пропорционален его заряду. Коэффициент пропорциональности между потенциалом проводника и его зарядом называется **электроемкостью (емкостью)** данного проводника:

$$C = \frac{q}{\phi} \quad (1).$$

Емкость проводника численно равна заряду, который нужно сообщить проводнику, чтобы его потенциал увеличился на 1 В. В системе СИ емкость измеряется в **фарадах**: (1Ф=1Кл/1В). Фарада - очень большая единица измерения емкости. Емкость уединенных проводников мала, поэтому на практике применяют более мелкие единицы – милли-, микро-, пикофарады. Увеличить емкость проводника можно, расположив вблизи него другой проводник и разделив их диэлектрической прослойкой. Если этим проводникам сообщить равные по величине, но противоположные по знаку заряды, то через диэлектрик они будут притягиваться друг к другу. Такая система более устойчива по сравнению с уединенным проводником и называется **конденсатором**. **Конденсатор** – это система из двух проводников (обкладок) с одинаковыми по модулю, но противоположными по знаку зарядами, форма и расположение которых таковы, что электрическое поле сосредоточено в узком зазоре между обкладками. **Емкостью конденсатора** называется физическая величина, равная отношению заряда q , накопленного в конденсаторе, к разности потенциалов $\phi_1 - \phi_2 = U$ между его обкладками:

$$C = \frac{q}{\phi_1 - \phi_2} = \frac{q}{U} \quad (2).$$

По типу диэлектрика конденсаторы подразделяются на бумажные, масляные, воздушные, электролитические и др. В зависимости от формы обкладок конденсаторы бывают плоские, цилиндрические и сферические. Емкость плоского конденсатора (две параллельные металлические пластины площадью S каждая, расположенные на расстоянии d друг от друга) равна:

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d} \quad (3),$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость среды, ϵ_0 – электрическая постоянная.

Любой конденсатор имеет **пробивное напряжение** – разность потенциалов между обкладками конденсатора, при которой происходит **пробой** – электрический разряд через слой диэлектрика.

Электрическая энергия заряженного конденсатора равна:

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{qU}{2} \quad (4).$$

Сила, с которой пластины конденсатора притягиваются друг к другу, называется *пандеромоторной силой*. Эта сила совершает работу за счет уменьшения потенциальной энергии системы

$$F = -\frac{dW}{dx} = -\frac{q^2}{2\epsilon\epsilon_0 S} \quad (5).$$

На схемах конденсатор обозначается в виде $\text{—}||\text{—}$. При соединении конденсаторов в батарею, ее емкость зависит от способа их соединения.

При последовательном соединении конденсаторов (рис. 1) величина заряда на каждой из обкладок одинакова, а разность потенциалов равна:

$$U = \varphi_1 - \varphi_3 = (\varphi_1 - \varphi_2) + (\varphi_2 - \varphi_3) = U_1 + U_2 \quad (6),$$

где U_1, U_2 – напряжения между обкладками первого и второго конденсаторов.

С учетом соотношения (2) получим

$$\frac{q}{C} = U = U_1 + U_2 = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} \quad \text{или} \quad \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (7).$$

Таким образом, при **последовательном соединении** конденсаторов величина, обратная емкости батареи, равна сумме обратных величин емкостей каждого из конденсаторов.

При параллельном соединении (рис. 2) общий заряд батареи конденсаторов равен сумме зарядов на обкладках каждого конденсатора:

$$q = q_1 + q_2 \quad (8).$$

Отсюда, в соответствии с формулой (2), результирующая емкость батареи конденсаторов будет равна

$$C = C_1 + C_2 \quad (9).$$

Таким образом, при **параллельном соединении** емкость батареи равна сумме емкостей конденсаторов.

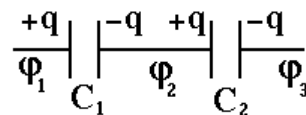


Рис. 1. Последовательное соединение конденсаторов

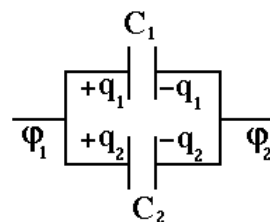


Рис. 2. Параллельное соединение конденсаторов

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Для определения емкости конденсатора пользуются схемой, приведенной на рисунке 3. Напряжение подается

от источника ЭДС $\mathcal{E}$. Потенциометр R необходим для регулировки напряжения, подаваемого на обкладки конденсатора C или соединения конденсаторов. В положении 1 ключа K конденсатор заряжается до напряжения U . В положении 2 ключа происходит разрядка конденсатора через **баллистический гальванометр**. Такое название имеют гальванометры с большим моментом инерции рамки с током. Если на гальванометр подать напряжение, то его измерительная рамка отклоняется. Вследствие инерции рамки гальванометра, стрелка установится в определенном положении не мгновенно, а лишь спустя некоторое время τ_z . Установлено, что

если время прохождения тока через гальванометр τ будет намного меньше τ_z , то отклонение стрелки гальванометра будет пропорционально не напряжению, а количеству прошедшего через него заряда. **Таким образом, при выполнении условия $\tau \ll \tau_z$, гальванометр может быть использован для измерения количества заряда, прошедшего через него.** Для надежности выполнения данного условия, специальными приемами увеличивают момент инерции рамки гальванометра. Такой гальванометр со специально утяжеленной рамкой и называют **баллистическим**. Отклонение рамки такого гальванометра пропорционально величине заряда, прошедшего через него:

$$q = C_B \cdot n \quad (10),$$

где n – отклонение рамки гальванометра, а C_B – постоянная гальванометра. Зная заряд на обкладках конденсатора и напряжение между обкладками, по формуле (2) можно определить емкость конденсатора. Однако, постоянная гальванометра, как правило, неизвестна. Поэтому гальванометр вначале градуируют. Для этого через гальванометр пропускают известный по величине заряд от эталонного конденсатора $C_{\text{эт}}$, заряженного до определенного напряжения. Величину этого заряда можно рассчитать по формуле

$$q = C_{\text{эт}} \cdot U \quad (11).$$

Через гальванометр пропускают различные по величине заряды и записывают соответствующие отклонения стрелки n . По данным q и n строят градуировочную кривую (предполагается, что эта зависимость линейная). После этого к гальванометру подключается конденсатор с неизвестной емкостью. Если заряд на обкладках и напряжение между ними известны, то емкость определяется из соотношения (2). Заряд может быть легко найден из показаний гальванометра с помощью градуировочного графика.

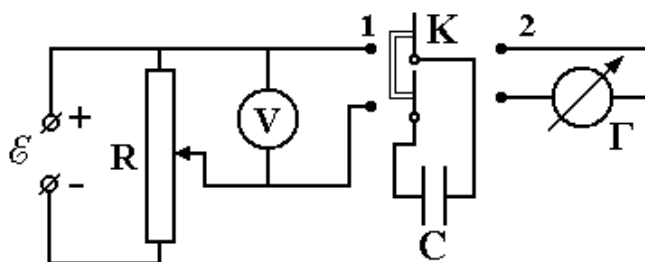


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое емкость проводника, емкость конденсатора? Единицы измерения емкости.
2. Как определяется емкость плоского конденсатора? Как определяется энергия конденсатора? Что такое пондеромоторная сила?
3. Получить формулы для последовательного и параллельного соединения конденсаторов.
4. Для чего нужен в данной работе баллистический гальванометр? Какую роль выполняет эталонная емкость?
5. Пластины конденсатора, разделенные вакуумом и заряженные зарядами противоположного знака, притягиваются друг к другу с определенной силой. Как изменится эта сила, если увеличить расстояние между пластинами конденсатора, или если между ними поместить диэлектрик. Рассмотреть два случая: а) конденсатор остается подключенным к источнику ЭДС, б) конденсатор отключается от источника ЭДС? Ответ обосновать.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 37

ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОТЫ ВЫХОДА ЭЛЕКТРОНА ИЗ МЕТАЛЛА

Цель работы: изучить явление термоэлектронной эмиссии. Исследовать явление термоэлектронной эмиссии в вакуумном диоде. Определить работу выхода электрона для нити накала этого диода.

Приборы и оборудование: вакуумный диод, источник анодного напряжения и источник накала катода, амперметр, миллиамперметр, вольтметр, реостат.

Теоретическое введение. Явление испускания электронов нагретыми телами называется *термоэлектронной эмиссией*. Для описания этого явления необходимо, прежде всего, учесть состояние электронов, находящихся в объеме металла. Рассмотрим условия, при которых электроны могут покинуть металл (иными словами, условия, при которых может происходить эмиссия электронов). Металл представляет собой кристаллическое тело, в узлах кристаллической решетки которого расположены положительно заряженные ионы. Между ионами находятся «свободные электроны», которые могут свободно перемещаться внутри металла. Как показывают опыты, свободные электроны при обычных температурах практически не покидают металл. Это указывает на то, что в поверхностном слое металла возникает задерживающее электрическое поле, препятствующее выходу электронов из металла. Работа, которую нужно затратить для удаления электрона из металла в вакуум, называется *работой выхода $A_{\text{вых}}$ электронов из металла*. Существуют две вероятные причины появления работы выхода:

1. Если электрон по какой-то причине удален из металла, то в том месте, которое электрон покинул, возникает избыточный положительный заряд и электрон притягивается к индуцированному им самим положительному заряду.

2. Электроны, покинувшие металл, создают над поверхностью металла «*электронное облако*». Это облако вместе с наружным слоем положительных ионов решетки образует *двойной электрический слой*, который и препятствует выходу свободных электронов из металла.

Таким образом, чтобы вырвать электрон из металла, необходимо сообщить ему дополнительную энергию, равную работе, которую он должен совершить по преодолению этого задерживающего электрического поля двойного слоя. Разность потенциалов $\Delta\phi$ в этом слое называется *поверхностным скачком потенциала*. С повышением температуры металла скорость хаотического движения некоторых электронов возрастает настолько, что они преодолевают задерживающее электрическое поле и покидают пределы проводника. Иначе говоря, кинетическая энергия этих электронов оказывается больше, чем работа выхода электрона, которую он должен совершить для преодоления силы притяжения ионов. Кулоновские силы притяжения перестают действовать только на значительном расстоянии от поверхности металла, поэтому теоретически покинувшим металл считается только электрон, удаленный из металла на «бесконечность». На *бесконечности* энергия электрона считается *равной нулю*. Работа выхода зависит от химической природы металлов и от чистоты их поверхности. Работа выхода выражается в *электрон-вольтах* (эВ): 1эВ равен работе, которую совершают силы поля при перемещении элементарного электрического заряда между двумя точками, разность потенциалов между которыми равна 1 В: (1 эВ = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж).

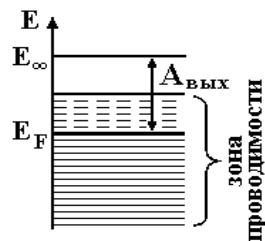


Рис. 1. Энергетическая диаграмма металла

Объясним работу выхода электронов с точки зрения зонной теории твердого тела. Для этого рассмотрим энергетические уровни электронов в зоне проводимости металлов (рис. 1). Чем выше температура кристалла, тем более высокие уровни энергии может занимать электрон в зоне проводимости. При уменьшении температуры, наоборот, электрон занимает все более низкие уровни. Таким образом, при абсолютном нуле температуры (0 К) все состояния с энергией, меньшей некоторого значения E_F , будут заполнены электронами, состояния же с энергией $E > E_F$ будут вакантными (на рисунке 1 незанятые при 0 К уровни изображены штрихами). Энергетический уровень с энергией E_F называется *уровнем Ферми* при абсолютном нуле. *Энергия Ферми* это максимальная кинетическая энергия, которую могут иметь электроны в металле при нуле градусов Кельвина. Для удаления из металла разным электронам нужно сообщить не одинаковую энергию. Так, электрону, находящемуся на самом нижнем уровне зоны проводимости, необходимо сообщить большую энергию, чем электрону, находящемуся на уровне Ферми. Наименьшая энергия, которую необходимо сообщить электрону, находящемуся на уровне Ферми, для того чтобы удалить его из металла в вакуум, называется *работой выхода*.

Работу выхода принято обозначать через $e \cdot \phi$ ($A_{\text{вых}} = e \cdot \phi$), где e – заряд электрона, ϕ – величина, называемая *потенциалом выхода*. Из рисунка 1 видно, что работа выхода электрона из металла определяется выражением

$$A_{\text{вых}} = E_{\infty} - E_F = 0 - (-E_F) = E_F \quad (1),$$

где $E_{\infty}=0$ – энергия электрона, находящегося на бесконечности от кристалла; E_F – энергия электрона, находящегося на уровне Ферми.

Очевидно, чтобы началась эмиссия электронов из металла, достаточно каким-либо способом сообщить им энергию, превышающую работу выхода. Этого можно достичь, в частности, нагреванием металла до такой температуры, при которой тепловая энергия электронов начнет превышать $A_{\text{вых}}$. По источнику энергии этот вид эмиссии электронов и получил свое название – **термоэлектронная эмиссия**. Кроме того, существуют **фотоэлектронная эмиссия** – эмиссия электронов из металла под действием электромагнитного излучения; **автоэлектронная эмиссия** – эмиссия электронов с поверхности металлов под действием сильного внешнего электрического поля; **вторичная электронная эмиссия** – испускание электронов поверхностью металлов, полупроводников при бомбардировке их пучком электронов.

В электронной лампе термоэлектроны, испущенные нагретым катодом, устремляются к положительно заряженному аноду, замыкая тем самым анодную цепь лампы. Зависимость силы тока, протекающего через лампу, от приложенного к аноду напряжения выражается **законом Богуславского-Ленгмюра (законом трех вторых)** :

$$I = B \cdot U^{3/2} \quad (2),$$

где B – коэффициент, зависящий от параметров лампы.

Кривая зависимости силы тока в электронной лампе от анодного напряжения называется **вольтамперной характеристикой**. На рисунке 2 представлено семейство вольтамперных характеристик, соответствующих различным температурам поверхности металла катода ($T_1 < T_2 < T_3 < T_4$). Из графика видно, что лампа обладает нелинейным сопротивлением, т.е. для нее не выполняется закон Ома. Нелинейность закона обусловлена наличием облака пространственного отрицательного заряда, окружающего раскаленный катод. С увеличением анодного напряжения концентрация электронов в облаке пространственного заряда уменьшается, и ток увеличивается. Начиная с некоторого напряжения, возрастание силы тока прекращается, наступает **насыщение**. Максимальное значение электрического тока называется **током насыщения**. Это объясняется тем, что почти все электроны, покидающие катод, достигают анода, поэтому дальнейшее увеличение напряжения на аноде не может привести к увеличению термоэлектронного тока. **Плотность тока насыщения** $j_{\text{нас}}$ зависит от температуры катода и от работы выхода электрона из металла. Эта зависимость выражается **формулой Ричардсона - Дэшмана**:

$$j_{\text{нас}} = C \cdot T^2 \cdot \exp \left(-\frac{e\phi}{kT} \right) \quad (3),$$

где $e\phi$ – работа выхода электрона из металла, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура катода, C – постоянная, характеризующая данный металл ($C=1,2 \cdot 10^6 \text{ A}/(\text{м}^2 \cdot \text{K}^2)$).

В результате логарифмирования (3) и последующих преобразований получаем:

$$A_{\text{вых}} = e \cdot \phi = k \cdot T \cdot \{ \ln (C \cdot T^2) - \ln j_{\text{нас}} \} \quad (4).$$

Это выражение и используется в дальнейшем для определения работы выхода электронов из катода.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Для наблюдения термоэлектронной эмиссии может быть применена электрическая цепь, содержащая вакуумный диод, источник анодного напряжения и источник накала катода (рис. 3). Если катод нагреть до некоторой температуры, то вылетевшие из него электроны образуют электронное облако над поверхностью металла. Электроны не могут покинуть металл, так как на них действует кулоновская сила притяжения со стороны оказавшегося положительно заряженным металла. Электроны вылетают и снова возвращаются в металл, так что устанавливается динамическое равновесие, подобно равновесию между жидкостью и ее насыщенным паром. Если с помощью внешнего источника напряжения создать электрическое поле, направленное от анода к катоду, то электронное облако катода будет «рассасываться» и в цепи возникает анодный ток. Величина анодного тока зависит от температуры катода и от анодного напряжения. Если анодное напряжение увеличить настолько, чтобы каждый электрон, вылетевший из катода, попал на анод, то величина анодного тока будет зависеть только от температуры катода. Этот ток называется **током насыщения**.

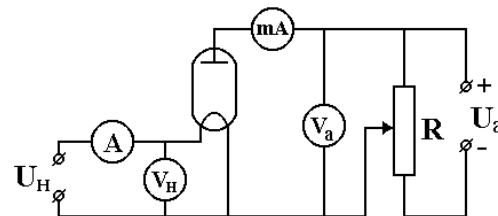


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое эмиссия электронов? Назовите виды эмиссии. В чем состоит явление термоэлектронной эмиссии?
2. Пользуясь положениями зонной теории и основываясь на энергетической диаграмме, объясните, что называется работой выхода электрона из металла.
3. Записать и объяснить закон Богуславского-Ленгмюра и формулу Ричардсона – Дэшмана.
4. Объясните, почему вольтамперная характеристика диода позволяет определить работу выхода электронов из материала катода.
5. Объясните ход вольтамперной характеристики диода, связав его с процессами в области катода. Что такое ток насыщения?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 26

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОСИ КРУГОВОГО ТОКА

Цель работы: изучить свойства магнитного поля, ознакомиться с понятием магнитной индукции. Определить индукцию магнитного поля на оси кругового тока.

Приборы и оборудование: источник постоянного тока, кольцевой проводник, магнитная стрелка, реостат, миллиамперметр, переключатель (ключ).

Теоретическое введение. *Магнитное поле.* Существование в природе магнитного поля проявляется в многочисленных явлениях, простейшими из которых являются взаимодействие движущихся зарядов (токов), тока и постоянного магнита, двух постоянных магнитов. Магнитное поле **векторное**. Это означает, что для его количественного описания в каждой точке пространства необходимо задать вектор $\vec{B}$ магнитной индукции. Иногда эту величину называют просто **магнитной индукцией**. Направление вектора магнитной индукции совпадает с направлением магнитной стрелки, находящейся в рассматриваемой точке пространства и свободной от других воздействий. Так как магнитное поле является силовым, то его изображают с помощью **линий магнитной индукции** – линий, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора магнитной индукции в этих точках поля. Принято через единичную площадку, перпендикулярную $\vec{B}$, проводить количество линий магнитной индукции, равное величине магнитной индукции. Таким образом, густота линий соответствует величине B . Опыты показывают, что в природе отсутствуют магнитные заряды. Следствием этого является то, что линии магнитной индукции замкнуты. Магнитное поле называется **однородным**, если векторы индукции во всех точках этого поля одинаковы, то есть, равны по модулю и имеют одинаковые направления. Для магнитного поля справедлив **принцип суперпозиции**: магнитная индукция результирующего поля, создаваемого несколькими токами или движущимися зарядами, равна **векторной сумме** магнитных индукций полей, создаваемых каждым током или движущимся зарядом.

В однородном магнитном поле на прямолинейный проводник действует **сила Ампера**:

$$\vec{F} = I [\vec{l}, \vec{B}] \quad (1),$$

где $\vec{l}$ – вектор, равный по модулю длине проводника l и совпадающий с направлением тока I в этом проводнике.

Направление силы Ампера $\vec{F}$ определяется **правилом правого винта** (векторы $\vec{F}$, $\vec{l}$ и $\vec{B}$ образуют правовинтовую систему): если винт с правой резьбой расположить перпендикулярно к плоскости, образуемой векторами $\vec{l}$ и $\vec{B}$, и вращать его от $\vec{l}$ к $\vec{B}$ по наименьшему углу, то поступательное движение винта укажет направление силы $\vec{F}$. В скалярном виде соотношение (1) можно записать следующим образом:

$$F = I \cdot l \cdot B \cdot \sin \alpha \quad \text{или} \quad B = \frac{F}{I \cdot l \cdot \sin \alpha} \quad (2).$$

Из последнего соотношения вытекает **физический смысл магнитной индукции**: магнитная индукция однородного поля численно равна силе, действующей на проводник с током 1 А, длиной 1 м, расположенный перпендикулярно направлению поля.

Единицей измерения магнитной индукции в СИ является **Тесла (Тл)**: $1 \text{ Тл} = \frac{1 \text{ Н}}{1 \text{ А} \cdot 1 \text{ м}}$.

Магнитное поле кругового тока. Электрический ток не только взаимодействует с магнитным полем, но и создает его. Опыт показывает, что в вакууме элемент тока $I d\vec{l}$ создает в точке пространства магнитное поле с индукцией

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I [d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3} \quad (3),$$

где $\frac{\mu_0}{4\pi}$ – коэффициент пропорциональности, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнитная постоянная, $d\vec{l}$ – вектор, численно равный длине dl элемента проводника и совпадающий по направлению с элементарным током, $\vec{r}$ – радиус-вектор, проведенный от элемента проводника $d\vec{l}$ в рассматриваемую точку поля, r – модуль радиуса-вектора. Соотношение (3) было экспериментально установлено Био и Саваром, проанализировано Лапласом и поэтому называется **законом Био-Савара-Лапласа**. Согласно правилу правого винта, вектор магнитной индукции $d\vec{B}$ в рассматриваемой точке оказывается перпендикулярным элементу тока $I d\vec{l}$ и радиус-вектору $\vec{r}$.

На основе закона Био-Савара-Лапласа и принципа суперпозиции проводится расчет магнитных полей электрических токов, текущих в проводниках произвольной конфигурации, путем интегрирования по всей длине проводника. Например, магнитная индукция магнитного поля в центре кругового витка радиусом R , по которому течет ток I , равна:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot R} \quad (4).$$

Линии магнитной индукции кругового и прямого токов показаны на рисунке 1. На оси кругового тока линия магнитной индукции является прямой. Направление магнитной индукции связано с направлением тока в контуре

правилом правого винта. В применении к круговому току его можно сформулировать так: если винт с правой резьбой вращать по направлению кругового тока, то поступательное движение винта укажет направление линий магнитной индукции, касательные к которым в каждой точке совпадают с вектором магнитной индукции.

Если имеется не одиночный, а многовитковый контур с числом витков N , то магнитная индукция будет больше, чем у одновиткового, также в N раз. Если поместить контур с током в некоторую среду с относительной магнитной проницаемостью μ , то произойдет увеличение магнитной индукции в μ раз. Магнитное поле на некотором расстоянии от контура ослабевает. Учитывая все эти факторы из закона Био-Савара-Лапласа можно получить выражение для магнитной индукции на оси кругового тока:

$$B = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot N \cdot I \cdot R^2}{2(R^2 + x^2)^{3/2}}, \quad (5)$$

где R – радиус кольца, x – расстояние от центра кольца до точки оси, в которой определяется магнитная индукция.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В данной работе измерение магнитной индукции поля кругового тока осуществляется путем сопоставления ее с вектором магнитной индукции другого поля, численное значение и направление которого заранее известны. Это горизонтальная составляющая магнитного поля Земли B_0 , линии индукции которого направлены от северного магнитного полюса Земли к южному, а численное значение горизонтальной составляющей в наших широтах составляет $2 \cdot 10^{-5}$ Тл.

Если через кольцевой контур, установленный в плоскости магнитного меридиана, пропускать электрический ток, то на магнитное поле Земли B_0 наложится перпендикулярное ему поле B , создаваемое этим током. Магнитная стрелка при этом установится по направлению результирующего вектора магнитной индукции Земли и кругового тока $B_{\text{сум}}$. (рис. 2). Из геометрии (рис. 2) следует, что

$$B = B_0 \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (6)$$

где α - угол поворота стрелки после включения тока в контуре.

Установка представляет собой пластмассовое кольцо с намотанной на него проволокой (рис. 3). Кольцо располагается в вертикальной плоскости. В центре кольца на вертикальной оси (игле) вращается магнитная стрелка МС. Величина силы тока в проволоке регулируется с помощью реостата R , а контролируется миллиамперметром. Направление тока можно изменить на противоположное переключателем Π .

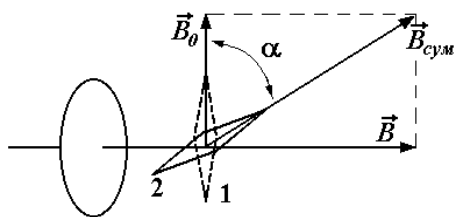


Рис. 2. Положение магнитной стрелки в поле Земли (проекция на горизонтальную плоскость):
1 – в отсутствие электрического тока в контуре;
2 – после включения тока

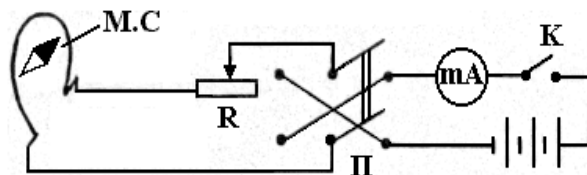


Рис. 3. Электрическая схема установки

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какая физическая величина является силовой характеристикой магнитного поля? Единицы ее измерения.
2. Изобразить магнитное поле кругового тока. Является ли оно однородным?
3. Сформулировать правило правого винта для кругового тока.
4. Каков принцип измерения магнитного поля, создаваемого электрическим током кольца, в этой работе?
5. В формулу (3) входит векторное произведение $[\vec{dl}, \vec{r}]$. Объяснить, как определяются модуль и направление вектора, получающегося в результате векторного перемножения двух векторов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 31

СИЛЫ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ. ИЗМЕРЕНИЕ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЭЛЕКТРОДИНАМОМЕТРОМ

Цель работы: проанализировать силовое воздействие магнитного поля на проводник с током. Исследовать магнитное поле электромагнита и измерить магнитную индукцию поля электродинамометром.

Приборы и оборудование: электромагнит, два источника тока, два амперметра, два реостата.

Теоретическое введение. *Силы в магнитном поле.* На точечный заряд q , движущийся со скоростью $\vec{V}$ в магнитном поле с индукцией $\vec{B}$, действует сила Лоренца:

$$\vec{F} = q [\vec{v}, \vec{B}] \quad (1),$$

Раскрыв векторное произведение получим, что модуль силы Лоренца равен:

$$F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha \quad (2),$$

где α - угол между векторами $\vec{V}$ и $\vec{B}$.

Направление силы Лоренца $\vec{F}$ определяется **правилом правого винта** (векторы $\vec{F}$, $\vec{V}$ и $\vec{B}$ образуют правовинтовую систему): если винт с правой резьбой расположить перпендикулярно к плоскости, образуемой векторами $\vec{V}$ и $\vec{B}$, и вращать его от $\vec{V}$ к $\vec{B}$ по наименьшему углу, то поступательное движение винта укажет направление силы $\vec{F}$.

Аналогично, **сила Ампера** – сила, действующая на прямолинейный проводник длиной l с током I , помещенный в однородное магнитное поле, определяется соотношением:

$$\vec{F} = I [\vec{l}, \vec{B}] \quad (3).$$

Модуль силы Ампера определяется следующим образом:

$$F = I \cdot l \cdot B \cdot \sin \alpha \quad (4),$$

где α - угол между векторами $\vec{l}$ и $\vec{B}$. При этом необходимо иметь в виду, что за направление вектора $\vec{l}$ принимается направление протекания тока по проводнику.

Направление силы Ампера $\vec{F}$ определяется также **правилом правого винта** (векторы $\vec{F}$, $\vec{l}$ и $\vec{B}$ образуют правовинтовую систему): если винт с правой резьбой расположить перпендикулярно к плоскости, образуемой векторами $\vec{l}$ и $\vec{B}$, и вращать его от $\vec{l}$ к $\vec{B}$ по наименьшему углу, то поступательное движение винта укажет направление силы $\vec{F}$.

Ферромагнетики. Все вещества по своим магнитным свойствам делятся на три класса: **диамагнетики**, **парамагнетики**, **ферромагнетики**. У ферромагнетиков магнитная проницаемость μ может достигать значения в сотни тысяч, в то время как у других веществ она едва отличается от единицы.

При помещении магнетиков в магнитное поле они способны намагничиваться, что является следствием существования в них микротоков, обусловленных движением электронов в атомах и молекулах вещества. Количественной характеристикой намагничивания магнетиков является **намагниченность** – векторная величина, численно равная суммарному магнитному моменту атомов единицы объема вещества:

$$\vec{J} = \frac{\sum \vec{P}_a}{V}. \quad (5).$$

У диамагнетиков и парамагнетиков после снятия внешнего поля намагниченность возвращается к нулевому значению. У ферромагнетиков же сохраняется большая остаточная намагниченность. В слабомагнитных материалах (диамагнетиках и парамагнетиках) намагниченность J линейно изменяется с ростом напряженности магнитного поля H . У ферромагнетиков при увеличении H , намагниченность растет сначала быстро, а затем выходит на насыщение. Установлено, что такое поведение ферромагнетиков объясняется тем, что они состоят из множества микроскопических, спонтанно (самопроизвольно) намагниченных до насыщения областей – **доменов**. Это явление называется **ферромагнетизмом**.

При отсутствии внешнего магнитного поля магнитные моменты отдельных доменов ориентированы произвольно (хаотично) и компенсируют друг друга (рис. 1а). Поэтому суммарный магнитный момент ферромагнетика равен нулю и ферромагнетик не намагничен. При внесении во внешнее магнитное поле магнитные моменты некоторых доменов начинают поворачиваться по полю. Если постепенно увеличивать напряженность внешнего поля, то все большее количество доменов ориентируется вдоль него (участок 1 кривой на рис. 2). При этом некоторые домены могут расти за счет соседних. При слабых полях намагниченность может быть снята уменьшением H до нуля. При больших значениях H происходят скачкообразные повороты магнитных моментов отдельных доменов (участок 2 на рис. 2). В этом случае процесс становится необратимым, – после снятия внешнего поля намагниченность ферромагнетика уменьшается лишь на небольшую величину.

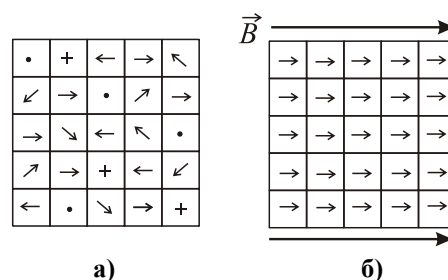


Рис. 1. Схема ориентации доменов:
а) вне поля, б) в магнитном поле

При дальнейшем увеличении напряженности магнитного поля достигается **насыщение** – векторы намагниченности всех доменов оказываются ориентированными вдоль внешнего поля (рис. 16). Переориентация доменов при намагничивании и размагничивании ферромагнетика требует совершения работы, которая, в конечном счете, переходит в тепло. Необратимость процесса намагничивания ферромагнетиков является причиной **магнитного гистерезиса** – отставания намагниченности J (рис. 2) или магнитной индукции B от изменения напряженности магнитного поля H . При периодическом изменении напряженности поля от $+H_N$ до $-H_N$ и обратно до $+H_N$ намагниченность магнитного поля будет изменяться в соответствии с замкнутой кривой 3-4-5-6-7-8 (рис. 2), которая называется **максимальной петлей гистерезиса (или предельным циклом)**. Это название объясняется тем, что кривая, полученная при достижении насыщения, имеет максимальную площадь, которая при увеличении H сверх H_N (**напряженности насыщения**) не может быть больше увеличена. При уменьшении напряженности от H_N до нуля (участок 3) намагниченность уменьшается только до некоторого значения $J_{ост}$. При этом остаточная магнитная индукция $B_{ост}$ связана с остаточной намагниченностью $J_{ост}$ соотношением

$$B_{ост} = \mu_0 \cdot J_{ост} \quad (6),$$

Ликвидация остаточной намагниченности может быть достигнута при наложении обратного поля величиной $-H_K$. Напряженность H_K называется **коэрцитивной силой ферромагнетика**. Дальнейшее изменение намагниченности J идет по кривой 5-6-7-8. Если пределы изменения H в цикле будут меньше H_N , то площадь петли гистерезиса (9-10) оказывается меньше площади предельного цикла. В этом случае петля гистерезиса называется **частным циклом**.

Для каждого ферромагнетика имеется определенная температура, называемая **точкой Кюри**, при которой он теряет свои магнитные свойства. При нагревании выше точки Кюри, ферромагнетик превращается в обычный парамагнетик.

Магнитное поле электромагнита. В данной работе необходимо изучить магнитное поле электромагнита, используя тот факт, что на проводник с током, внесенный в магнитное поле, действует сила, пропорциональная магнитной индукции (выражение (3)).

Электромагнит представляет собой кольцевой железный сердечник, на который намотан провод в виде катушки. При изучении магнитного поля в веществе различают два типа токов: **макроскопические токи** (макротоки), то есть электрические токи, протекающие по проводникам в электрических цепях (ток через катушку) и **микроскопические токи** (микротоки), обусловленные движением электронов в атомах и молекулах (ток в сердечнике). Намагниченность постоянных магнитов является следствием существования в них микротоков. Магнитное поле, создаваемое макротоками (внешнее магнитное поле), оказывает ориентирующее, упорядочивающее действие на микротоки, в результате чего в веществе возникает дополнительное магнитное поле микротоков (внутреннее магнитное поле).

Таким образом, магнитное поле в веществе $\vec{B}$ складывается из двух полей: внешнего $\vec{B}_0$ и внутреннего $\vec{B}'$:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}' \quad (7).$$

Магнитное поле макротоков описывается вектором напряженности $\vec{H}$. Для однородной изотропной среды магнитная индукция связана с напряженностью следующим соотношением:

$$\vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H} \quad (8),$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

Магнитная индукция поля микротоков определяется формулой:

$$\vec{B}' = \mu_0 \vec{J} \quad (9),$$

где $\vec{J}$ – намагниченность, численно равная суммарному магнитному моменту атомов единицы объема вещества.

С учетом (8) и (9) выражение (7) примет вид:

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot (\vec{H} + \vec{J}) \quad (10).$$

Как видно из соотношения (10), магнитная индукция внутри сердечника зависит как от напряженности $\vec{H}$ магнитного поля, так и от намагниченности $\vec{J}$ сердечника.

Величина напряженности H пропорциональна силе тока $I_{эл}$, протекающего через электромагнит,

$$H = n \cdot I_{эл} \quad (11).$$

Коэффициент n определяется конфигурацией катушки и числом витков в ней.

Намагниченность же сердечника может быть представлена в виде:

$$\vec{J} = \vec{J}_{ост} + \chi \vec{H} \quad (12),$$

где χ – магнитная восприимчивость материала сердечника, а $J_{ост}$ – остаточная намагниченность, которая сохраняется у сердечника после отключения тока через катушку. Величина $\chi \cdot \vec{H}$ – дополнительная намагниченность, возникающая вследствие протекания тока в электромагните. После подстановки соотношения (12) в (10), получим:

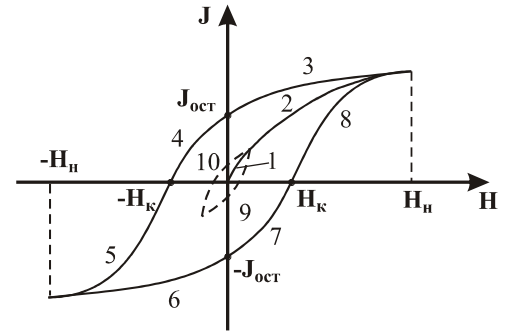


Рис. 2. Петля гистерезиса для ферромагнетика

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \chi \vec{H}) + \mu_0 \cdot \vec{J}_{ост} \quad (13).$$

Обозначив получаемое после вынесения за скобки $\vec{H}$ выражение $(1+\chi)$ через μ получим:

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \mu \cdot \vec{H} + \mu_0 \cdot \vec{J}_{ост} \quad (14).$$

Коэффициент μ называется *относительной магнитной проницаемостью* вещества. Он показывает во сколько раз магнитная индукция в веществе больше чем в вакууме. Подставив в (14) значение H из (11) получим:

$$B = k \cdot I_{эл} + B_{ост} \quad (15),$$

где $B_{ост} = \mu_0 \cdot J_{ост}$ – остаточная магнитная индукция, $k = \mu \cdot \mu_0 \cdot n$ – коэффициент пропорциональности.

Таким образом, индукция в сердечнике электромагнита *линейно зависит* от силы тока в его обмотке.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В работе необходимо изучить зависимость магнитной индукции электромагнита от силы тока, протекающего через него. Задачей исследования является проверка выражения (13). Для измерения индукции используется проводник с током, который располагается между полюсами электромагнита перпендикулярно линиям магнитной индукции. Если известна сила F , действующая на проводник с током, длина l участка проводника, находящегося в однородном магнитном поле, и сила тока, протекающего через проводник $I_{пр}$, то магнитная индукция может быть найдена из соотношения

$$B = \frac{F}{I_{пр} \cdot l} \quad (16).$$

Сердечник электромагнита имеет разрез для размещения пробного проводника (рис. 3). Регулирование и контроль тока через электромагнит осуществляется реостатом R и амперметром $A_{эл}$, а через проводник – реостатом R_1 и амперметром $A_{пр}$. Проводник с током расположен на коромысле, которое, в свою очередь, закреплено на оси OO_1 . На том же коромысле закреплены противовес $Пр$ и шкала $Шк$, вдоль которой перемещается грузик Γ . При отсутствии тока через проводник коромысло занимает равновесное положение, которое устанавливается по флажку Φ .

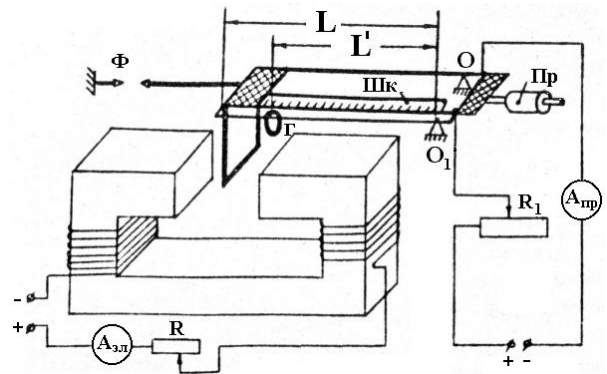


Рис. 3. Схема установки для определения магнитной индукции

Направление токов $I_{эл}$ и $I_{пр}$ подбираются так, чтобы сила Ампера, действующая на проводник, выталкивала его вверх. Для того, чтобы привести коромысло в нулевое положение после включения электромагнита, необходимо переместить груз Γ из нулевого положения в положение L' по шкале. Из условия равенства моментов сил относительно оси OO_1 , действующих на коромысло со стороны проводника (силы Ампера $\vec{F}$) и груза Γ (веса $\vec{P}$), следует:

$$F \cdot L - P \cdot L' = 0, \quad \text{откуда} \quad F = \frac{P \cdot L'}{L} \quad (17),$$

где L и L' – расстояния от оси до точек приложения силы $\vec{F}$ и веса груза $\vec{P}$.

Подставляя это выражение в (16) получим выражение для определения магнитной индукции:

$$B = \frac{P \cdot L'}{I_{пр} \cdot l \cdot L} \quad \text{или} \quad B = K' \cdot L' \quad (18),$$

где $K' = \frac{P}{I_{пр} \cdot l \cdot L}$ – коэффициент, определяемый параметрами установки. (19)

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дать определение силы Лоренца, силы Ампера? Как определяется модуль этих сил?
2. Как определяется направление силы Ампера, действующей на проводник с током, помещенный в магнитное поле?
3. Каков физический смысл относительной магнитной проницаемости вещества μ ?
4. Что представляют собой макро- и микротоки?
5. Ферромагнетики. Основные свойства ферромагнетиков.
6. Описать явление магнитного гистерезиса.
7. Какова зависимость между силой тока в электромагните и создаваемой им магнитной индукцией?
8. На чем основан метод экспериментального определения индукции магнитного поля в данной работе?
9. Почему график зависимости $B(I_{эл})$, как правило, не проходит через начало координат?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 38

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОСИ СОЛЕНОИДА

Цель работы: изучить магнитное поле соленоида, определить магнитную индукцию внутри соленоида.

Приборы и оборудование: соленоид, источник постоянного тока, амперметр, ключ, измерительная катушка, баллистический гальванометр.

Теоретическое введение. Соленоид представляет собой тонкий провод, навитый на цилиндрический каркас. Если через обмотку соленоида пропускать электрический ток силой I , то внутри соленоида возникает магнитное поле. Напряженность магнитного поля вне бесконечного равномерно намотанного соленоида равна нулю, а внутри него определяется током, протекающим через соленоид, и плотностью витков n (числом витков на один метр длины соленоида)

$$H = n \cdot I \quad (1).$$

Как видно из (1), единицей измерения H в СИ является А/м. Характерно, что H не зависит от среды, в которой находится соленоид. Поскольку H определяется конфигурацией проводов и токами, протекающими в них, то этот параметр является регулируемым, т.е. задается человеком. Практически формула (1) оказывается справедливой и в случае соленоида с конечной длиной, но при условии, что длина его значительно превышает диаметр. Напряженность магнитного поля соленоида зависит от направления тока в обмотке и находится по **правилу правого винта**: если вращать винт по движению тока в обмотке, то поступательное движение острия винта совпадет с направлением напряженности магнитного поля $\vec{H}$. Напряженность магнитного поля внутри бесконечного соленоида складывается из напряженности каждой из его половин, располагающихся по левую и правую стороны от точки, в которой мы определяем H . Поэтому справедливо полагать, что на краю полубесконечного соленоида значение H должно быть примерно вдвое меньше, чем внутри него.

Магнитная индукция – силовая характеристика магнитного поля и может быть определена только с помощью индикатора. Роль индикатора может выполнять проводник с током, магнитная стрелка. В данной работе индикатором является измерительная катушка с подключенным к ней гальванометром.

В случае отсутствия внутри и вблизи соленоида ферромагнетиков и при не слишком быстро меняющемся токе магнитная индукция оказывается прямо пропорциональной напряженности магнитного поля H :

$$B = \mu \cdot \mu_0 \cdot H = \mu \cdot \mu_0 \cdot n \cdot I = \mu \cdot \mu_0 \cdot \frac{N_{\text{сол}}}{l} \cdot I \quad (2),$$

где μ_0 – магнитная постоянная, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, а μ – относительная магнитная проницаемость среды, $N_{\text{сол}}$ – число витков соленоида, l – длина соленоида. То есть магнитная индукция в какой-либо точке пространства определяется совокупностью всех факторов, создающих магнитное поле – плотностью витков соленоида, током и свойствами среды.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В данной работе необходимо теоретические положения о распределении магнитного поля в соленоиде подтвердить экспериментально. Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 1. Для измерения индукции магнитного поля внутри соленоида C вводится измерительная катушка $ИК$, замкнутая на баллистический гальванометр Γ .

Измерение магнитной индукции внутри соленоида в работе производится по методу, предложенному А.Г. Столетовым. В основу метода положено **явление электромагнитной индукции**. Оно состоит в том, что при изменении магнитного потока в контуре

возникает электродвижущая сила (ЭДС) $\mathcal{E}$, численно равная скорости изменения этого потока:

$$\mathcal{E}_i = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (3),$$

где Φ – магнитный поток, охватываемый контуром. Знак «минус» в выражении (3) отражает **правило Ленца**, состоящее в том, что ЭДС, возникающая в контуре, возбуждает в нем ток такого направления, который препятствует изменению внешнего магнитного потока.

Магнитный поток, пронизывающий каждый виток, равен:

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot S_L \cdot \cos \alpha \quad (4),$$

где $\vec{B}$ – вектор магнитной индукции; $\vec{S} = S_L \cdot \vec{n}$, S_L – площадь, охватываемая контуром L , $\vec{n}$ – единичный вектор нормали к плоскости контура; α – угол между вектором магнитной индукции и нормалью к контуру (рис. 2).

Данное определение (4) применимо только к плоскому контуру. Если контур охватывает поверхность произвольной формы (например, поверхность сферы), то угол α меняется от точки к точке, и в этом случае необходимо переходить к интегрированию по поверхности. То же самое касается случая неоднородного магнитного поля, когда от точки к точке меняется вектор $\vec{B}$.

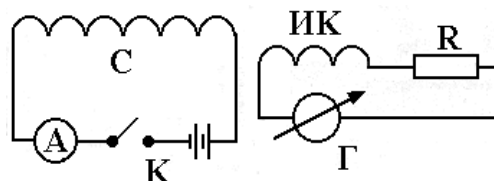


Рис. 1. Схема установки для измерения магнитной индукции

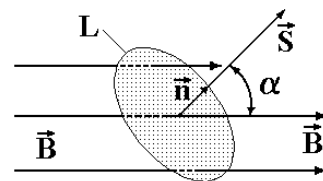


Рис. 2. Определение магнитного потока через контур L

При изменении магнитного поля в измерительной катушке из N витков возникает ЭДС индукции

$$\mathcal{E}_i = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (5),$$

которая, в соответствии с законом Ома, вызывает протекание в цепи тока силой

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{\mathcal{E}_i}{R} = \frac{N}{R} \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (6),$$

где q – заряд, а R – сопротивление цепи гальванометра.

Следовательно, при изменении магнитного потока на величину $\Delta\Phi$ через гальванометр пройдет заряд Δq , численно равный

$$\Delta q = \frac{N}{R} \cdot \Delta\Phi \quad (7).$$

Отклонение рамки баллистического гальванометра n_Γ пропорционально заряду, прошедшему через него

$$\Delta q = C_B \cdot n_\Gamma \quad (8),$$

где C_B – баллистическая постоянная гальванометра, Кл/дел.

Предположим, что после замыкания ключа K спустя некоторое время в соленоиде возникает стационарный магнитный поток Φ . Тогда при размыкании ключа K изменение магнитного потока составляет $-\Phi$. С учетом соотношений (7), (8) и (4) отклонение рамки гальванометра будет равно

$$n_\Gamma = \frac{\Delta q}{C_B} = \frac{N \cdot B \cdot S}{C_B \cdot R} \quad (9).$$

Отсюда легко находится величина индукции магнитного поля

$$B = \frac{C_B \cdot R \cdot n_\Gamma}{N \cdot S} \quad (10).$$

С другой стороны, зная силу тока I в обмотке соленоида, можно с помощью соотношения (2) оценить величину магнитной индукции внутри соленоида.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем принципиальное отличие между напряженностью магнитного поля и магнитной индукцией?
2. Что такое соленоид? Подробно опишите магнитное поле соленоида.
3. Чем определяется напряженность магнитного поля соленоида? Единицы измерения напряженности и индукции магнитного поля.
4. Дать определение магнитного потока. Какова единица измерения магнитного потока?
5. Сформулировать закон электромагнитной индукции и правило Ленца.
6. Какое явление лежит в основе метода А.Г. Столетова?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 39

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИВОЙ НАМАГНИЧЕНИЯ ЖЕЛЕЗА

Цель работы: изучить теорию ферромагнетизма. Определить кривую намагниченности железа.

Приборы и оборудование: источник постоянного тока, кольцо с двумя обмотками, баллистический гальванометр, амперметр, реостат, переключатель.

Теоретическое введение. Все вещества по своим магнитным свойствам делятся на три класса: **диамагнетики**, **парамагнетики**, **ферромагнетики**. У ферромагнетиков магнитная проницаемость μ может достигать значения в сотни тысяч, в то время как у других веществ она едва отличается от единицы.

Магнитная индукция зависит не только от тока и конфигураций проводников, по которым они текут, но и от вещества, окружающего эти проводники. Каждый электрон, входящий в состав атомов вещества, вследствие движения по замкнутой орбите привносит вклад в магнитный момент атома, которому он принадлежит. В свою очередь, магнитные моменты молекул $\vec{P}_m$ складываются из магнитных моментов атомов их образующих. Под действием магнитного поля, создаваемого макроскопическими токами, магнитные моменты молекул вещества ориентируются вдоль направления поля. В результате в веществе создается нескомпенсированный магнитный момент, который изменяет начальное магнитное поле.

При помещении магнетиков в магнитное поле они способны намагничиваться, что является следствием существования в них микротокков, обусловленных движением электронов в атомах и молекулах вещества. Количественной характеристикой намагничения магнетиков является **намагниченность** – векторная величина, численно равная суммарному магнитному моменту атомов единицы объема вещества:

$$\vec{J} = \frac{\sum \vec{P}_a}{V} \quad (1).$$

Единицей измерения намагниченности является А/м. У диамагнетиков и парамагнетиков после снятия внешнего поля намагниченность возвращается к нулевому значению. У ферромагнетиков же сохраняется большая остаточная намагниченность. Установлено, что такое поведение ферромагнетиков объясняется тем, что они состоят из множества микроскопических, спонтанно (самопроизвольно) намагниченных до насыщения областей – **доменов**. Это явление называется **ферромагнетизмом**.

При отсутствии внешнего магнитного поля магнитные моменты отдельных доменов ориентированы произвольно (хаотично) и компенсируют друг друга (рис. 1а). Поэтому суммарный магнитный момент ферромагнетика равен нулю и ферромагнетик не намагничен. При внесении ферромагнетика во внешнее магнитное поле магнитные моменты некоторых доменов начинают поворачиваться по полю. Если постепенно увеличивать напряженность внешнего поля, то все большее количество доменов ориентируется вдоль него. При этом некоторые домены могут расти за счет соседних.

При изучении магнитного поля в веществе различают два типа токов: **макроскопические токи** (макротоки), т. е. электрические токи, протекающие по проводникам в электрических цепях и **микроскопические токи** (микротоки), обусловленные движением электронов в атомах и молекулах (более подробно см. лаб. работу № 31). Для описания поля, создаваемого только макроскопическими токами, вводится величина $\vec{H}$, называемая **напряженностью** магнитного поля. Путем изменения конфигурации проводов и токов, протекающих по ним, можно изменить величину напряженности магнитного поля $\vec{H}$. В результате совместного действия макроскопических токов и намагничения в веществе создается магнитное поле с индукцией $\vec{B}$, которая может быть найдена из соотношения

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot (\vec{H} + \vec{J}) \quad (2).$$

При не слишком сильных полях намагниченность оказывается пропорциональной напряженности поля:

$$\vec{J} = \chi \cdot \vec{H} \quad (3),$$

где χ – магнитная восприимчивость вещества. Подставляя (3) в (2), получим

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot (1 + \chi) \cdot \vec{H} = \mu_0 \cdot \mu \cdot \vec{H} \quad (4),$$

где $\mu = 1 + \chi$ – относительная магнитная проницаемость. В вакууме $\chi = 0$, а значит $\mu = 1$. Поэтому в вакууме индукция $\vec{B}_0$ связана с напряженностью $\vec{H}$ соотношением

$$\vec{B}_0 = \mu_0 \cdot \vec{H} \quad (5).$$

Следовательно, относительная магнитная проницаемость равна:

$$\mu = \frac{B}{B_0} \quad (6).$$

Относительная магнитная проницаемость показывает во сколько раз магнитная индукция в веществе больше чем в вакууме.

Прямая пропорциональность между намагниченностью $\vec{J}$ и напряженностью $\vec{H}$ поля наблюдается только в слабых полях. При больших значениях $\vec{H}$ возникает явление насыщения, состоящее в том, что **все магнитные моменты** атомов устанавливаются строго вдоль линий внешнего магнитного поля. Дальнейшее увеличение $\vec{H}$ уже не может привести к возрастанию $\vec{J}$. В этом случае соотношение (2) можно записать в виде:

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot (\vec{H} + \vec{J}_{\text{нас}}) \quad (7),$$

где $\vec{J}_{\text{нас}}$ – максимально возможная намагниченность вещества, достигаемая при насыщении. Из последнего соотношения следует, что в области насыщения магнитная индукция меняется только благодаря изменению поля, создаваемого макроскопическими токами (рис. 2).

Зависимость индукции $\vec{B}$ от напряженности $\vec{H}$ внешнего магнитного поля называется **кривой намагничения ферромагнетика**. Если эта кривая получена при наложении поля на образец, ранее не подвергавшийся воздействию магнитного поля, то эта кривая называется **основной**. По ней определяется максимальная магнитная проницаемость μ_{max} . Существенной особенностью ферромагнетиков является зависимость μ от H . Из выражений (4) и (2), записанных в скалярном виде, выразим относительную магнитную проницаемость μ :

$$\mu = \frac{\mu_0 H + \mu_0 J}{\mu_0 H} = 1 + \frac{J}{H} \quad (8).$$

Относительная магнитная проницаемость μ ферромагнетика вначале быстро растет с возрастанием H , так как все большее число доменов ориентируется по полю, затем достигает максимума (при насыщении, когда $J = J_{\text{нас}}$), после чего убывает, стремясь к единице в очень сильных намагничивающих полях (рис. 2). Это объясняется тем, что при очень больших значениях напряженности H в формуле (8) можно пренебречь величиной $\mu_0 J_{\text{нас}}$ по сравнению с $\mu_0 H$. Максимальные значения μ для ферромагнетиков очень велики: $\mu_{\text{max}} \sim 10^3 \div 10^6$.

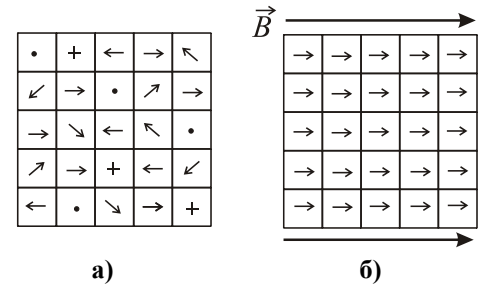


Рис. 1. Схема ориентации доменов:

а) вне поля, б) в магнитном поле

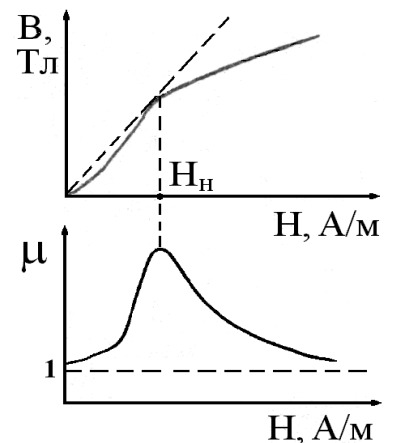


Рис. 2. Зависимость магнитной индукции и относительной магнитной проницаемости в ферромагнетике от напряженности внешнего поля

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В основу установки положен метод, предложенный А.Г. Столетовым. Он состоит в следующем. Изучаемый образец представляет собой кольцо с двумя обмотками (рис. 3.). Через первичную обмотку с числом витков N_1 , которая равномерно распределена по всему кольцу, пропускают ток I . При этом в обмотке создается магнитное поле напряженности H , вычисляемое для тора по формуле

$$H = \frac{N_1 \cdot I}{l} \quad (9),$$

где l - длина осевой линии кольца.

Для определения индукции $\vec{B}$, возникающей под действием этой напряженности в веществе кольца, Столетов предложил использовать явление электромагнитной индукции. Если быстро изменить направление тока в первичной обмотке на обратное, то полное изменение магнитного потока внутри нее будет равно $\Delta\Phi = 2 \cdot B \cdot S$, где S - площадь сечения кольца.

Во вторичной катушке с числом витков N_2 возникает ЭДС электромагнитной индукции:

$$\mathcal{E}_i = -N_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (10),$$

которая, в соответствии с законом Ома, вызывает протекание в цепи тока силой

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{\mathcal{E}_i}{R_2} = \frac{N_2}{R_2} \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (11),$$

где q - заряд, протекающий через вторичную обмотку; R_2 - сопротивление цепи вторичной обмотки, в которую включен гальванометр Γ .

Тогда заряд Δq , протекающий через вторичную катушку, будет равен

$$q = \frac{N_2}{R_2} \cdot \Delta\Phi = \frac{2 \cdot B \cdot S}{R_2} \cdot N_2 \quad (12),$$

Для определения заряда служит баллистический гальванометр, при этом величина заряда определяется соотношением

$$q = C_B \cdot n, \quad (13),$$

где C_B - постоянная баллистического гальванометра, а n - максимальное отклонение стрелки. Приравнявая правые части уравнений (12) и (13) получим выражение для определения магнитной индукции:

$$B = \frac{C_B \cdot R_2}{2 \cdot S \cdot N_2} \cdot n = K \cdot n \quad (14),$$

где K - величина, определяемая параметрами данной установки

$$K = \frac{C_B \cdot R_2}{2 \cdot S \cdot N_2} \quad (15).$$

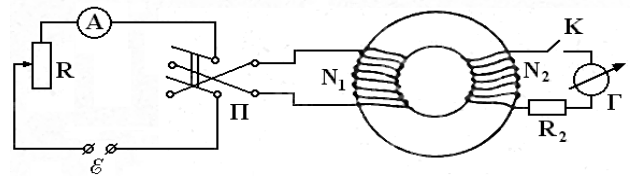


Рис. 3. Схема установки для определения кривой намагничивания железа

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие типы магнетиков существуют в природе? Чем они отличаются?
2. В чем заключается суть доменной теории ферромагнетизма?
3. Что называется намагниченностью вещества? Показать, что единицей измерения намагниченности является А/м.
4. Что называется напряженностью магнитного поля? Зависит ли она от намагниченности вещества?
5. Что называется основной кривой намагничивания ферромагнетика? Объяснить, чем объясняется наличие на ней области насыщения.
6. Объяснить сущность метода Столетова, использованного в работе для определения магнитной индукции в материале сердечника.
7. Объяснить полученную зависимость $\mu(H)$.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 42

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА

Цель работы: изучить характер движения электрона в магнетроне под действием силы Лоренца. Определить удельный заряд электрона.

Приборы и оборудование: магнетрон, соленоид, источники тока, амперметр, вольтметр, мультиметр.

Теоретическое введение. Важнейшими характеристиками электрона являются его заряд и масса. При движении электрона в электростатических и магнитных полях его траектория определяется конфигурацией этих полей и отношением заряда электрона e к его массе m . Существуют различные методы определения удельного заряда электрона $|e|/m$, в основе которых лежат результаты исследования движения электрона в электрическом и магнитном полях. Один из них – метод магнетрона. Называется он так потому, что конфигурация полей в нем напоминает конфигурацию полей в магнетронах – генераторах электромагнитных колебаний.

В настоящей работе для определения удельного заряда электрона e/m используется магнетрон – электронная лампа 6Е5С с цилиндрическим катодом, расположенным по оси анода. Магнетрон помещается внутрь соленоида, в котором создано однородное магнитное поле с индукцией $\vec{B}$, направленное вдоль оси соленоида и, следовательно, вдоль оси катода магнетрона. Между анодом и катодом создается электростатическое поле с напряженностью $\vec{E}$, направленное по радиусу к центру цилиндра. Со стороны этого поля на электрон действует сила

$$\vec{F}_e = e \cdot \vec{E} \quad (1),$$

направленная вдоль радиуса цилиндра от катода к аноду.

Со стороны магнитного поля, в которое помещен магнетрон, на электрон действует сила Лоренца:

$$\vec{F}_L = e \cdot [\vec{v}, \vec{B}], \text{ а ее модуль } F_L = e \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha \quad (2),$$

где $\vec{v}$ – вектор скорости электрона, e – заряд электрона, $\vec{B}$ – вектор магнитной индукции поля магнетрона. Так как в магнетроне $\vec{v} \perp \vec{B}$, то $\sin \alpha = 1$. Направление силы Лоренца определяется правилом правого винта (смотри лабораторную работу № 31).

В отсутствие магнитного поля электрон движется под действием электрического поля, а траектория электрона – прямая, совпадающая с радиусом магнетрона (рис. 1). При наложении магнитного поля траектория электрона искривляется под действием силы Лоренца и становится близкой к окружности. Вылетающие с катода электроны имеют различные скорости, что обуславливает различные значения силы Лоренца, действующей на них. Если магнитная индукция не слишком велика, то большая часть электронов достигает поверхности анода (траектория 1 на рисунке 1) и через магнетрон будет протекать электрический ток. Увеличение магнитной индукции до критического значения $B_{кр}$ приводит к тому, что число электронов достигающих анода уменьшается, а соответственно уменьшается и анодный ток. В этом случае траектория электрона, все больше искривляясь, лишь касается анода (кривая 2). При дальнейшем увеличении магнитной индукции радиус траекторий становится столь малым, что ни один электрон не достигает анода (кривая 3), и ток через цепь прекращается. Если бы скорости всех электронов были одинаковы, то при значениях $B \geq B_{кр}$ должно наблюдаться резкое уменьшение тока до нуля (кривая 1 на рисунке 2), но, так как скорости движения электронов имеют некоторый разброс, то зависимость анодного тока I_a от величины магнитной индукции B внешнего поля имеет вид кривой 2 на рисунке 2. Наибольший наклон кривой соответствует критическому значению $B_{кр}$.

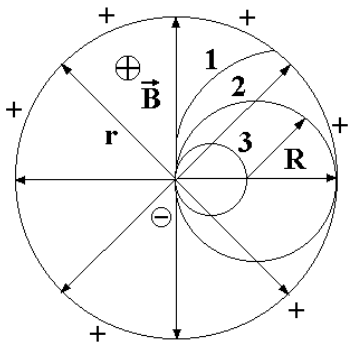


Рис. 1. Вид траекторий электрона в магнетроне

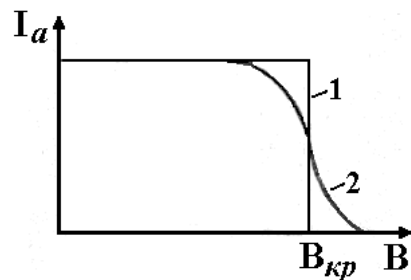


Рис. 2. Зависимость силы тока в магнетроне от величины магнитной индукции

Оценим критическое значение магнитной индукции. Под действием силы Лоренца электрон движется по дуге окружности. Согласно II закону Ньютона уравнение движения имеет вид:

$$m \vec{a}_{цс} = \vec{F}_L \quad \frac{m \cdot v^2}{R} = e \cdot v \cdot B \quad (3),$$

где R – радиус траектории электрона, который для критического поля $B_{кр}$ вдвое меньше радиуса r магнетрона (рис. 1), т.е. $R_{кр} = r/2$.

Учитывая, что энергия электрона накапливается в результате прохождения им разности потенциалов, равной анодному напряжению U , можно записать

$$\frac{m \cdot v^2}{2} = e \cdot U \quad (4).$$

Исключая скорость из соотношений (3) и (4) получим:

$$\frac{e}{m} = \frac{2 \cdot U}{B^2 \cdot R^2} = \frac{8 \cdot U}{B^2 \cdot r^2} \quad (5).$$

Магнитная индукция внутри соленоида пропорциональна току, протекающему через него:

$$B = k \cdot I_c \quad (6).$$

Для критического значения индукции

$$B_{кр} = k \cdot I_{кр} \quad (7).$$

Кривые, показанные на рисунке 2, называются *сбросовыми характеристиками*. С учетом соотношения (6), сбросовой характеристикой можно считать зависимость анодного тока от тока, протекающего через соленоид, тогда наибольший наклон кривой $I_a = f(I_c)$ соответствует критическому значению силы тока в соленоиде.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Установка состоит из двух независимых электрических цепей: цепи питания соленоида и цепи питания магнетрона. Ток в цепи соленоида измеряется амперметром A_c , а анодный ток - амперметром A_a . Напряжение между катодом и анодом измеряется вольтметром V .

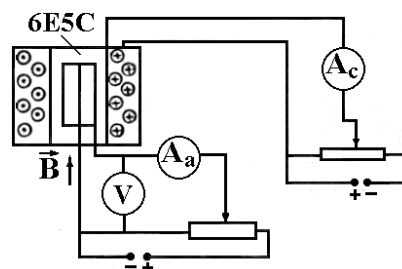


Рис. 3. Схема установки для определения удельного заряда электрона

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое удельный заряд электрона?
2. Что такое сила Лоренца? Как определяется ее модуль и направление.
3. Магнетрон. Его устройство.
4. Траектория движения электрона в магнетроне.
5. В чем заключается сущность метода определения удельного заряда электрона?
6. Вывести расчетную формулу для определения удельного заряда электрона.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Основная задача физического эксперимента – измерение **физических величин** X для дальнейшего их анализа и установления взаимосвязей между ними – физических законов.

Измерение X – это процесс определения значения физической величины с помощью технических средств измерений (измерительных устройств). Результаты измерения физических величин всегда являются не абсолютно точными, а приближенными. Точность измерения зависит от чувствительности приборов и восприимчивости органов чувств экспериментатора.

Абсолютной погрешностью измерения ΔX называют модуль разности между измеренным значением X и ее истинным значением $X_{ист}$

$$\Delta X = |X - X_{ист}|.$$

Истинное значение $X_{ист}$, вообще говоря, неизвестно. За истинное значение величины X принимают ее среднее значение X_{cp} . Для этого проводят несколько измерений $X_1, X_2, \dots, X_n$ и рассчитывают X_{cp} как

$$X_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i,$$

где n – число измерений.

Чем больше проведено измерений X_i , тем больше вероятность того, что ошибки разных знаков компенсируют друг друга, и тем ближе будет X_{cp} к истинному значению $X_{ист}$.

Абсолютная погрешность измерения определяет количественное отклонение измеряемой величины от истинного значения. Однако она не всегда оказывается наглядной. Допустим, что $\Delta X = 5$ см. Много это или мало? Если измеряется длина X подошвы обуви, то это много. Если X – длина комнаты, то это мало. Если же X – расстояние между автобусными остановками, то это ничтожно мало.

Критерием качества проводимых измерений является отношение абсолютной погрешности измеряемой величины ΔX к её среднему значению X_{cp} , так называемая **относительная погрешность**

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta X}{X_{cp}},$$

которую можно выразить в процентах, умножив на 100%. Относительная ошибка, указанная в процентах, **округляется до целого числа**.

Измерения любых величин делятся на два вида: **прямые и косвенные**.

1) При **прямых измерениях** искомая физическая величина X считывается непосредственно со шкалы прибора, предназначенного для измерения. Так, массу тела можно измерить с помощью весов, длину – с помощью линейки и т. д.

2) При **косвенных измерениях** искомая величина Y не измеряется, а вычисляется по формуле с использованием величин прямых измерений X_i , входящих в расчетную формулу. Например, определение скорости тела по пройденному пути, измеренному линейкой, и времени, определенному по часам; или определение плотности тела по массе, измеренной на весах, и объему тела, определенному с помощью мензурки с водой.

Остановимся подробнее на методах расчета погрешностей (ошибок) при проведении прямых и косвенных измерений.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Различают две основных группы погрешностей: **систематические и случайные**. В этой классификации **не учитываются грубые ошибки (промахи)**, вызванные невнимательностью при снятии показаний со шкалы измерительных приборов, неправильной записью этих данных, а также просто неумением экспериментатора. Такие ошибки не подчиняются никакому закону.

Систематические погрешности – появляются систематически при повторных измерениях одним и тем же прибором. Возникают они чаще всего ввиду неточности измерительных приборов или самого метода измерений и остаются постоянными при повторных измерениях одной и той же величины. Например, длина линейки в действительности может отличаться от того значения, которое написано на ней. Тем не менее, прибор считается исправным, если его показания отличаются от истинного значения не более чем на величину абсолютной систематической погрешности. **Абсолютная систематическая погрешность имеет размерность измеряемой величины**.

Абсолютную систематическую погрешность прибора (инструментальную погрешность) можно определить тремя способами:

- а) по классу точности прибора;
- б) по прибору, как число с наименованием единиц измерений;
- в) по цене наименьшего деления шкалы прибора.

а) Определение абсолютной систематической ошибки $\Delta X_{\text{сист}}$ по классу точности прибора. Этот способ применяется, если класс точности прибора известен заранее. Например, для электроизмерительных приборов: **вольтметра и амперметра**. Класс точности E_x прибора указан на шкале прибора (обычно нижний левый угол) как число в десятичном формате. Систематическая ошибка определяется по формуле:

$$\Delta X_{\text{сист}} = \frac{E_x \cdot X_{\text{пред}}}{100\%},$$

где $X_{\text{пред}}$ – предельное значение шкалы прибора.

Например, класс точности амперметра равен 1,5, а наибольший ток, который можно измерить этим амперметром при конкретном режиме настройки, составляет 5 А. Тогда систематическая погрешность

$$\Delta I_{\text{сист}} = \frac{1,5\% \cdot 5\text{А}}{100\%} = 0,075\text{А}.$$

б) Определение абсолютной систематической ошибки $\Delta X_{\text{сист}}$ как числа с наименованием единиц измерений. Применяется для точных измерительных приборов, имеющих шкалу нониуса или микрометрическую шкалу (**штангенциркуль, микрометр**). В этом случае цена деления шкалы нониуса (микрометрической шкалы) указывается непосредственно на корпусе прибора **как число с наименованием единиц измерения** (в некоторых случаях указывается безразмерная величина в десятичном формате). Абсолютная систематическая погрешность такого измерительного прибора равна **наименьшему делению шкалы нониуса** (микрометрической шкалы). Например, цена деления шкалы нониуса штангенциркуля **0,1 мм**, абсолютная систематическая погрешность штангенциркуля равна **0,1 мм**.

в) Определение абсолютной систематической ошибки $\Delta X_{\text{сист}}$ по цене наименьшего деления шкалы прибора. Для приборов, показания которых изменяются плавно, и нет возможности определить их погрешность указанными выше методами, систематическая погрешность может быть оценена как **половина минимального деления** измерительной шкалы. Например, для миллиметровой измерительной линейки систематическая погрешность $\Delta l_{\text{сист}} = 0,5 \text{ мм}$. Исключения составляют измерения кварцевыми часами (стрелки передвигаются дискретно), приборами с неравномерными шкалами и электронными приборами. В этом случае систематическая погрешность принимается равной **минимальному делению шкалы**.

Случайные погрешности – изменяются при повторных измерениях случайным образом. Случайные факторы, обуславливающие разброс измеряемой величины X , могут быть вызваны различными причинами. С одной стороны, это могут быть причины, не зависящие от измеряемой величины, например, состояние организма человека, наблюдающего за прибором, вибрация, действие внешних электромагнитных полей, высокая влажность воздуха, отклонение температуры и давления от нормальных условий. С другой – сама измеряемая величина может носить случайный характер. Ошибки такого типа подчиняются законам теории вероятности, установленным для случайных величин.

Абсолютная случайная погрешность определяется всегда одинаково:

$$\Delta X_{\text{сл}} = t_{n,\alpha} \cdot \sigma,$$

где $t_{n,\alpha}$ – коэффициент Стьюдента, σ – стандартный доверительный интервал (среднеквадратичное отклонение результата измерения).

Коэффициент Стьюдента $t_{n,\alpha}$ зависит от **доверительной вероятности (надежности) α** и количества опытов n . **Надежность (α)** – это вероятность того, что значение измеренной величины окажется в интервале от $X - \Delta X$ до $X + \Delta X$. При построении техники всегда задается определенная надежность изделия. Каждая деталь должна соответствовать надежности не ниже той, которая предъявляется ко всему изделию в целом. Если техника сложная, то отклонение параметров деталей от заданных значений должно быть очень малым. При лабораторных измерениях обычно полагают $\alpha = 0,95$ и ограничиваются 3–5 измерениями. Коэффициент Стьюдента $t_{n,\alpha}$ можно определить по специальной таблице.

Таблица – Значения коэффициентов Стьюдента

Число измерений n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Надежность $\alpha = 0,95$	12,7	4,3	3,2	2,8	2,6	2,4	2,4	2,3	2,3

Стандартный доверительный интервал σ можно вычислить по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_{cp})^2}{n(n-1)}},$$

где X_{cp} – среднее арифметическое значение всех измерений, рассчитываемое по формуле:

$$X_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i.$$

Полная абсолютная погрешность ΔX прямых измерений определяется как:

$$\Delta X = \Delta X_{сист} + \Delta X_{сл},$$

где $\Delta X_{сист}$ – абсолютная систематическая погрешность, $\Delta X_{сл}$ – абсолютная случайная погрешность.

Окончательный результат измерения представляется в виде:

$X = (X_{cp} \pm \Delta X)$ <единицы измерения>; относительная погрешность $\varepsilon = \dots \%$; надежность $\alpha = \text{значение } \alpha$.

Например, $a = (2,9 \pm 0,3) \text{ м/с}^2$; $\varepsilon_a = 10 \%$ с надежностью $\alpha = 0,95$.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Рассмотрим методы определения погрешностей косвенных измерений.

Следует учитывать, что, если в расчетах используются табличные данные (без указания погрешностей), то обычно считается, что погрешность этой величины составляет $\pm 0,5$ разряда последней значащей цифры. Например, $\pi = 3,14 \pm 0,005$ или ускорение свободного падения $g = 9,8 \pm 0,05$.

1 метод. Пусть величина f является функцией нескольких переменных и ее можно представить в виде степенной функции вида $f(x, y, z, \dots) = (x)^n \cdot (y)^k \cdot (z)^m \dots$. Тогда для расчета ошибки косвенного измерения Δf можно использовать формулу (постоянные множители отбрасываются):

$$\Delta f = f_{cp} \sqrt{\left(\frac{n \cdot \Delta x}{x_{cp}}\right)^2 + \left(\frac{k \cdot \Delta y}{y_{cp}}\right)^2 + \dots + \left(\frac{m \cdot \Delta z}{z_{cp}}\right)^2},$$

где $x_{cp}, y_{cp}, z_{cp} \dots$ – средние значения величин прямых измерений, $\Delta x, \Delta y, \Delta z \dots$ – абсолютные ошибки этих измерений, $f_{cp} = (x_{cp})^n \cdot (y_{cp})^k \cdot (z_{cp})^m \dots$ – среднее значение величины f .

Описанную выше методику рассмотрим на примере формулы для расчета ускорения тела.

$$a(h, t) = \frac{2h}{t^2}$$

Преобразуем формулу следующим образом: $a(h, t) = \frac{2h}{t^2} = 2h^1 t^{-2}$.

Отбрасываем постоянный множитель 2.

Используя формулу метода, получаем абсолютную погрешность:

$$\Delta a = a_{cp} \sqrt{\left(\frac{1 \cdot \Delta h}{h_{cp}}\right)^2 + \left(\frac{-2 \cdot \Delta t}{t_{cp}}\right)^2} = a_{cp} \sqrt{\left(\frac{\Delta h}{h_{cp}}\right)^2 + \left(\frac{-2 \cdot \Delta t}{t_{cp}}\right)^2}.$$

Относительная погрешность:

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta a}{a_{cp}}.$$

2 метод. Нахождение погрешности путем логарифмирования и последующего дифференцирования расчетной формулы.

Пусть величина косвенных измерений является функцией нескольких переменных и определяется по формуле, включающей в себя сумму (разность) величин прямых измерений. Например, площадь трапеции

определяется по формуле $S = \frac{1}{2} h(a + b)$, где h – высота, a, b – длины оснований трапеции.

Для нахождения абсолютной погрешности в определении площади трапеции выполним следующую последовательность действий.

а) Логарифмируем расчетную формулу $\ln S = \ln \frac{1}{2} + \ln h + \ln(a + b)$.

При логарифмировании используем следующие свойства логарифмов:

$$\ln(a \cdot b) = \ln a + \ln b$$

$$\ln \frac{a}{b} = \ln a - \ln b$$

$$\ln(a^n) = n \cdot \ln a.$$

б) Дифференцируем полученное выражение, учитывая, что последнее слагаемое является функцией двух переменных:

$$\frac{dS}{S} = \frac{dh}{h} + \frac{da}{a+b} + \frac{db}{a+b}.$$

в) Заменяя дифференциалы соответствующими абсолютными погрешностями величин прямых измерений, возводя каждое слагаемое в квадрат и извлекая из каждой части квадратный корень, получим:

$$\sqrt{\left(\frac{\Delta S}{S_{cp}}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{\Delta h}{h_{cp}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta a}{a_{cp} + b_{cp}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta b}{a_{cp} + b_{cp}}\right)^2}.$$

Относительная погрешность измерений:

$$\varepsilon_s = \frac{\Delta S}{S_{cp}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta h}{h_{cp}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta a}{a_{cp} + b_{cp}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta b}{a_{cp} + b_{cp}}\right)^2}.$$

Абсолютная погрешность измерений:

$$\Delta S = S_{cp} \sqrt{\left(\frac{\Delta h}{h_{cp}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta a}{a_{cp} + b_{cp}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta b}{a_{cp} + b_{cp}}\right)^2}.$$

3 метод. Определение погрешности косвенных измерений через полный дифференциал функции многих переменных с последующей заменой дифференциалов соответствующими погрешностями.

Метод удобно использовать, если искомая величина является тригонометрической функцией нескольких (одной) переменных. Абсолютную ошибку косвенного измерения Δf можно вычислить по формуле:

$$\Delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \cdot \Delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \cdot \Delta y\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial z} \cdot \Delta z\right)^2}.$$

Здесь $\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}, \dots, \frac{\partial f}{\partial z}$ – частные производные функции $f=f(x, y, \dots, z)$.

Например, интенсивность света, прошедшего через поляризатор, определяется $I = I_0 \cos^2 \alpha$.

Тогда

$$\frac{dI}{d\alpha} = 2I_0 \cos \alpha \cdot (-\sin \alpha) = -I_0 \sin(2\alpha).$$

Абсолютная погрешность измерений:

$$\Delta I = \sqrt{(-I_0 \sin(2\alpha) \cdot \Delta \alpha)^2}.$$

Погрешность в определении углов следует подставлять в радианах: $[\Delta \alpha] = [rad]$.

Относительная погрешность измерений:

$$\varepsilon_I = \frac{\Delta I}{I_{cp}}.$$

ПРАВИЛА ОКРУГЛЕНИЯ ПРИ ЗАПИСИ РЕЗУЛЬТАТА

Измерения всегда приводят к приближенным значениям физических величин. При проведении математических операций часто также получают приближенные значения. Приближенные числа можно округлять, если это не окажет вредного влияния на практический результат. При округлении

приближенных чисел необходимо руководствоваться следующими правилами.

1 Косвенные измерения не могут быть точнее прямых измерений (количество знаков после запятой в косвенных и прямых измерениях должно быть **одинаковым**). В промежуточных вычислениях можно оставлять одну запасную цифру для уменьшения ошибки округления. В окончательном результате эта запасная цифра отбрасывается.

2 Если первая из отбрасываемых цифр больше или равна 5, то последняя цифра увеличивается на единицу. В противном случае последняя сохраняемая цифра не изменяется.

3 При сложении и вычитании, умножении и делении в полученном результате сохраняют столько десятичных знаков, сколько их содержится в числе с наименьшим количеством десятичных знаков.

4 В результате расчета значений функций вида x^n , $\sqrt[n]{x}$, $\ln(x)$ результат должен содержать столько значащих цифр, сколько их имеет число x .

5 В первую очередь округляют погрешность ΔX , только затем округляют саму приближенную величину X . После округления количество знаков после запятой в погрешности ΔX и среднем значении величины X_{cp} должно быть **одинаковым**.

ГРАФИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

При обработке полученного экспериментального материала для того, чтобы получить наглядное представление о зависимости одной физической величины от другой, часто прибегают к построению графиков. Графиками пользуются также для быстрого нахождения значения одной величины по данному значению другой величины. Для построения графиков чаще всего используют декартову систему координат. Графики экспериментальных зависимостей всегда строятся с учетом погрешности измерений.

Основные требования, предъявляемые к построению графиков

1 Графики строятся **карандашом** на миллиметровой бумаге или белой бумаге, на которую печатным способом нанесена координатная сетка. Допускается построение графиков методами компьютерной графики, но и в этом случае графики должны соответствовать всем изложенным требованиям.

2 На координатных осях должны быть указаны обозначения откладываемых величин и единицы их измерения.

3 Начало координат, если это оговорено особо, может не совпадать с нулевыми значениями величин. Его выбирают таким образом, чтобы площадь чертежа была использована **максимально**.

4 Перед построением графика для каждой из шкал необходимо **выбрать масштаб**. Масштабные деления на координатных осях нужно наносить **равномерно**, то есть через **равные** промежутки. Масштаб выбирают таким образом, чтобы кривая была равномерно растянута вдоль обеих осей. Если график представляет собой прямую, то угол ее наклона к осям должен быть близок к $40^\circ - 60^\circ$.

5 После выбора и нанесения на оси масштаба, наносятся значения физических величин. Экспериментальные точки изображаются четко и крупно маркерами (в виде кружков, прямоугольников, крестиков и т. д.). Координаты экспериментальных точек на осях **не указывают**, а линии, определяющие эти координаты, **не проводят**, так как это загромождает график и затрудняет работу с ним. Затем от каждой точки вверх и вниз, вправо и влево откладывают в виде отрезков соответствующие абсолютные погрешности измерений **в масштабе графика** (рис. 1).

6 После нанесения экспериментальных точек строится график, то есть проводится **предсказанная теорией плавная кривая** или **прямая** так, чтобы она пересекала все отложенные на графике отрезки, соответствующие абсолютным погрешностям измерений.

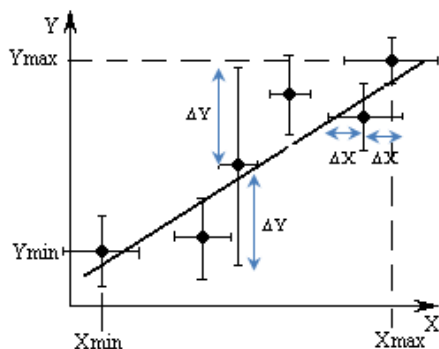
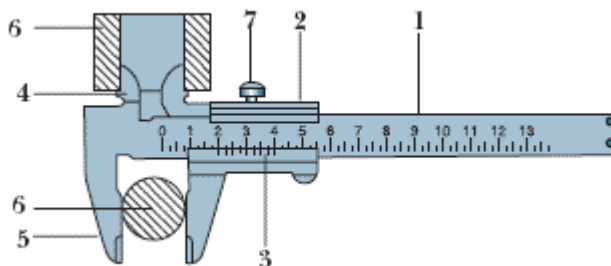


Рисунок 1 – Нанесение экспериментальных точек и погрешностей на график

При значительном разбросе экспериментальных точек кривую (прямую) следует проводить не по точкам, а между ними. Причем, количество точек по обе стороны от нее должно быть одинаковым. Суммы отклонений величин экспериментальных точек снизу и сверху кривой должны быть близки. Исключение составляют градуировочные графики, которые следует аппроксимировать между точками, нанесенными без погрешностей.

ОПИСАНИЕ ШТАНГЕНЦИРКУЛЯ И МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ ТЕЛ

Штангенциркуль – наиболее распространенный прибор, используемый для измерения линейных размеров тел (деталей) с высокой точностью.



Штангенциркуль (рис. 2) состоит из: линейки (штанги) – 1 с миллиметровыми делениями; подвижной рамки – 2 с нониусом – 3 и закрепляющим винтом – 7. На штанге и рамке имеются ножки (губки) – 4 и 5.

Рисунок 2 – Общий вид штангенциркуля

Для измерения штангенциркуль берут в правую руку, измеряемый предмет 6 помещают между ножками, придерживая его левой рукой. Надавливая на рамку большим пальцем правой руки, плотно зажимают предмет между ножками. Затем закрепляют винт и проводят отсчет по нониусу. Верхние ножки служат для определения внутренних отверстий предметов.

При определении размера детали поступают следующим образом:

1) Если нулевой штрих нониуса совпал с каким-либо штрихом штанги, то значение измеряемой величины отсчитывают только по основной шкале в миллиметрах.

2) Если же нулевой штрих нониуса не совпадает ни с одним штрихом основной шкалы, то значение измеряемой величины складывается из двух частей: целого числа миллиметров, отсекаемых нулевым штрихом нониуса на основной шкале штанги, и долей миллиметра, полученных умножением точности нониуса на порядковый номер его ненулевого штриха, совпавшего с некоторым делением штанги (рис. 3).

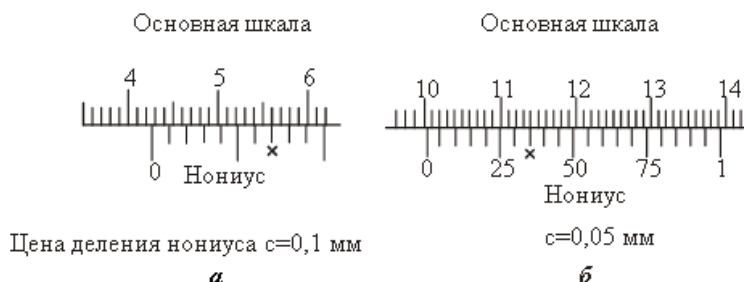


Рисунок 3 – Примеры взаимного расположения шкал штангенциркуля:

- а) размеры измеряемого предмета $D=42 \text{ мм} + 7 \cdot 0,1 \text{ мм} = 42,7 \text{ мм}$;
б) размеры измеряемого предмета $D=100 \text{ мм} + 7 \cdot 0,05 \text{ мм} = 100,35 \text{ мм}$

ОПИСАНИЕ МИКРОМЕТРА И МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ ТЕЛ

Микрометр представляет собой прибор, предназначенный для измерения линейных размеров с точностью до 0,01 мм.

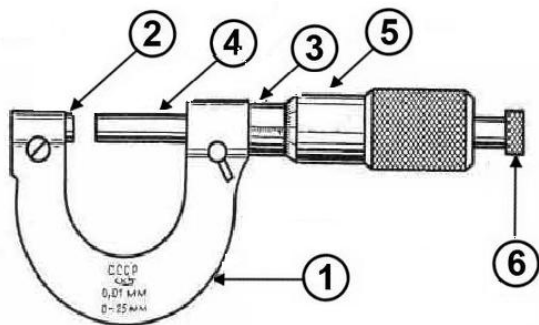


Рисунок 4 – Общий вид микрометра

Действие микрометра основано на свойстве винта совершать при его повороте поступательное перемещение, пропорциональное углу поворота. При измерении предмет зажимается между пяткой и микрометрическим винтом. Для вращения барабана при этом пользуются фрикционной головкой.

После того, как достигнута определенная степень нажатия на предмет, фрикционная головка начинает проскальзывать, издавая характерный треск. Благодаря этому, зажатый предмет деформируется сравнительно мало (его размеры не искажаются) и, кроме того, микрометрический винт предохраняется от порчи.

На трубке 3 нанесены **деления основной шкалы**. Барабан 5 при вращении винта перемещается вдоль трубки. Шаг винта подбирают таким, что один полный оборот барабана соответствует его смещению вдоль основной шкалы на длину наименьшего деления. На барабане нанесена **добавочная шкала**. Микрометры обычно бывают двух типов.

1 Основная шкала микрометра разбита на **миллиметры**. Шаг микрометрического винта также **1 мм**. На шкале барабана нанесено 100 равных делений. Ясно, что каждое из этих ста делений имеет достоинство 0,01 мм, так как при повороте барабана на одно деление его шкалы происходит поступательное перемещение микрометрического винта на 0,01 мм. Если нулевое деление барабана совпадает с прямой линией на трубке (рис. 5), то микрометр показывает целое число миллиметров, которое определяется делением основной шкалы, показавшимся из-под края барабана. Если же нуль шкалы барабана не совпадает с линией на трубке, то отсчет не равен целому числу миллиметров. В этом случае число целых миллиметров определяется последним видимым делением основной шкалы, а число сотых долей миллиметра — делением шкалы барабана, стоящим против линии на трубке. На рис. 5 измеряемая длина равна $9 \text{ мм} + 0,36 \text{ мм} = 9,36 \text{ мм}$.

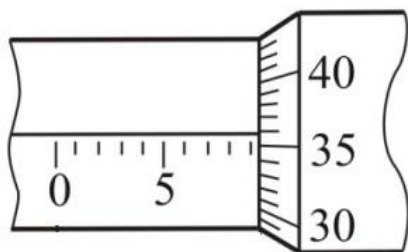


Рисунок 5 – Шкалы микрометра в случае, когда на барабане нанесено 100 делений

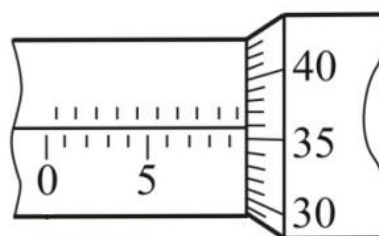


Рисунок 6 – Шкалы микрометра в случае, когда на барабане нанесено 50 делений

2 Основная шкала микрометра имеет цену деления, равную **0,5 мм**. При этом половинные деления, чтобы не загромождать шкалу, располагаются над прямой линией основной шкалы (рис. 6). Шаг микрометрического винта у таких микрометров равен 0,5 мм, а шкала барабана разбивается на 50 делений. Цена деления шкалы барабана равна 0,01 мм. При отсчетах на таком микрометре число сотых миллиметра, отсчитанное на шкале барабана против линии, прибавляют к числу целых миллиметров, если последним видимым делением основной шкалы является нижнее деление. Если же последним видимым делением является верхнее деление, то к целому числу миллиметров, определяемому последним видимым **нижним** делением, прибавляют 0,50 мм и число сотых, отсчитанное на шкале барабана. Например, на рис. 6 показания микрометра соответствуют $9 \text{ мм} + 0,50 \text{ мм} + 0,36 \text{ мм} = 9,86 \text{ мм}$.

Перед началом работы с микрометром следует убедиться в его исправности. Для этого вращением фрикционной головки приводят в соприкосновение микрометрический винт с пяткой. Момент соприкосновения определяется по сигналу трещотки. При этом край барабана должен располагаться над нулевым делением основной шкалы, а нуль шкалы барабана – против линии на трубке.

Вращать винт с усилием (за барабан) после того, как заработала трещотка, запрещается, так как это ведет к порче прибора.

Следует отметить, что микрометрический винт с отсчетным барабаном является составной частью многих измерительных приборов, таких, например, как окулярный микрометр и компаратор. Отсчеты на всех этих приборах производят так же, как было описано выше.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. **Савельев И.В.** Курс общей физики: [учеб. пособие для вузов по техн. направлениям и специальностям]: в 4 т./ И.В. Савельев. М.: КНОРУС, 2009 – т. 2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. - 2009. - 570 с.
 2. **Трофимова Т.И.** Курс физики. М.: Высшая школа. – 2003. 542 с.
 3. **Курбачев Ю.Ф.** Физика: учебное пособие / Ю.Ф. Курбачев. – М.: изд. центр ЕАОИ, 2011. - 216 с. Доступ из ЭБС «Университетская библиотека online».
 4. **Грабовский Р. И.** Курс физики [Электронный ресурс] : учебное пособие. Электрон. Дан. – СПб. : Лань, 2012. - 608 с. Доступ из ЭБС «Лань».
 5. **Кузнецов С.И.** Курс физики с примерами решения задач. Часть II. Электричество и магнетизм. Колебания и волны. 2014. – 416 с. Доступ из ЭБС «Лань».
-

Сергей Леонидович Кустов
Вероника Викторовна Романенко
Евгения Владимировна Черных
Наталья Михайловна Гурова

Лабораторные работы по физике
Часть II. Электричество и магнетизм