

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Казанский государственный
энергетический университет**

**Лабораторные работы по курсу
«Физика»**

**ЭЛЕКТРИЧЕСТВО.
ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ**

Казань 2011

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Казанский государственный
энергетический университет

Лабораторные работы по курсу
«Физика»

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО.
ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

Методическое пособие
по дисциплине «Физика»

Казань 2011

УДК 53
ББК 22.31
3 93

Рецензенты:

доктор физико-математических наук, профессор, зав. лабораторией УРАН КИББ Каз. НЦ РАН *А.В. Анисимов*; доктор технических наук, профессор Казанского государственного энергетического университета, зав. каф. ЭПА *Н.К. Андреев*

3 93 Лабораторные работы по курсу «Физика». Электричество: Электромагнетизм. Методическое пособие для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Физика» / Сост. В.Л. Матухин, О.С. Зуева, Г.Н. Зайнашева, В.В. Куржунов, С.Ф. Малацион, В.С. Рухлов, Ю.А. Сахратов, Т.А. Серебренникова. Под редакцией В.Л. Матухина – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2011. – 44 с.

Настоящий сборник содержит описания 7 лабораторных работ по разделам «Электричество» и «Электромагнетизм» курса физики. В описании каждой лабораторной работы приведена краткая теория изучаемого явления, рассмотрена методика проведения эксперимента и обработки экспериментальных данных. Способствуя усвоению теоретического материала и прививая навыки самостоятельной работы, пособие будет полезно для подготовки и выполнения лабораторных работ, а также для их правильного оформления.

Пособие соответствует программе рассматриваемых разделов курса физики для студентов энергетических специальностей. Предназначено для студентов технических специальностей, обучающихся на первых двух курсах Казанского государственного энергетического университета.

УДК 53
ББК 22.31

© В.Л. Матухин, О.С. Зуева, Г.Н. Зайнашева, В.В. Куржунов, С.Ф. Малацион, Ю.А. Сахратов Т.А. Серебренникова. Под редакцией В.Л. Матухина.

© Казанский государственный энергетический университет, 2011

Лабораторная работа №1

ОЗНАКОМЛЕНИЕ С ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫМИ ПРИБОРАМИ

Цель работы

Целью работы является изучение основных электроизмерительных приборов; методики измерений с помощью этих приборов

Измерения электрических величин

Электрическими измерениями называется измерение электрических величин: электрического напряжения, электрического сопротивления, силы тока, частоты и фазы переменного тока, электрической энергии, электрического заряда, индуктивности, электрической емкости и др. Благодаря созданию электротехнических устройств, преобразующих неэлектрические величины в электрические, методы и средства измерения электрических измерений используются для нахождения практически всех физических величин.

Для различных измерений в цепях постоянного и переменного тока в лабораторной практике используются электроизмерительные приборы. Эти приборы классифицируются по роду измеряемой величины: амперметры (миллиамперметры, микроамперметры), вольтметры (милливольтметры, микровольтметры), ваттметры, омметры и т.д.

Методы и средства измерения в цепях переменного и постоянного тока существенно различаются. В цепях переменного тока они зависят от частоты и характера изменения величин.

Для измерения электрических величин в цепях постоянного тока применяются, как правило, приборы магнитоэлектрического типа, принцип действия которых основан на взаимодействии рамки с током, величина которого пропорциональна измеряемой величине, с магнитным полем постоянного магнита.

Для измерения электрических величин в цепях переменного тока применяются электромагнитные приборы, принцип действия которых основан на взаимодействии магнитного поля, пропорционального измеряемой величине, с сердечником из ферромагнитного материала.

Широкое распространение получили цифровые электронные измерительные приборы, в которых аналоговый электрический сигнал преобразуется в цифровую форму. Такие приборы являются, как правило, многопредельными и позволяют измерять электрические величины как постоянного, так и переменного тока. Многофункциональные цифровые измерительные приборы называются мультиметрами.

Для визуального наблюдения и измерения параметров электрических сигналов применяются электронные осциллографы. Осциллографы

позволяют наблюдать как периодические сигналы, так и одиночные импульсы произвольной формы.

Основными характеристиками электроизмерительных приборов являются: система, класс точности, пределы измерений и чувствительность к измеряемой величине. Они обозначаются на шкале прибора условными знаками.

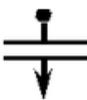
Системы приборов

Электроизмерительный прибор состоит из подвижной и неподвижной частей. По величине перемещения подвижной части можно судить о величине измеряемого тока, напряжения, мощности и т.д.

В зависимости от принципа действия измерительного механизма различают системы: магнитоэлектрическую, электромагнитную, электродинамическую, электростатическую и т.д.

Системы наиболее употребительных приборов приведены в табл.1.1

Таблица.1.1

№	Система прибора	Условное обозначение системы по шкале
1	Магнитоэлектрическая	
2	Термоэлектрическая	
3	Электромагнитная	
4	Электродинамическая	
5	Электростатическая	
6	Тепловая	
7	Индукционная	

Рассмотрим первые две системы более подробно. Работа приборов магнитоэлектрической системы основана на взаимодействии поля постоянного магнита и подвижной катушки, по которой протекает измеряемый ток. На рис.1.1 схематически показано устройство наиболее распространенного вида магнитоэлектрического прибора. Сильный постоянный магнит 1 из высококоэрцитивной стали скреплен с магнитопроводом 2 и полюсными наконечниками 3 из магнитомягкой стали. Между полюсными наконечниками укреплен цилиндрический сердечник 4 тоже из магнитомягкой стали. Подвижная катушка (рамка) 5 из тонкого медного или алюминиевого провода намотана на легкий алюминиевый каркас.

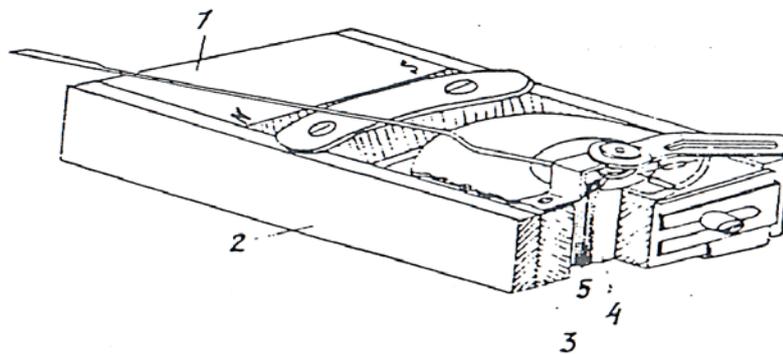


Рис. 1.1.

На оси подвижной части укреплена стрелка, конец которой перемещается по шкале прибора. Для создания противодействующего момента и одновременно для подвода тока в обмотку рамки служат две спиральные пружины. Так как угол поворота катушки α пропорционален току ($\alpha \sim I$), то чувствительность магнитоэлектрических приборов постоянна и шкала их равномерна.

Достоинством приборов магнитоэлектрической системы являются: высокая чувствительность к измеряемой величине; высокая точность (класс точности до 0,05); малое собственное потребление мощности; малая чувствительность к внешним магнитным полям. К недостаткам магнитоэлектрических приборов можно отнести возможность применения их только в цепях постоянного тока.

В приборах электромагнитной системы в неподвижной катушке, по которой протекает измеряемый ток, создается магнитное поле. В это магнитное поле втягивается, поворачиваясь на оси, ферромагнитный сердечник, намагничиваемый этим же полем.

Угол поворота сердечника пропорционален квадрату силы измеряемого тока. Так как $\alpha \sim I^2$, то: а) приборы электромагнитной системы могут применяться в цепях постоянного и переменного тока

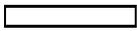
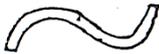
(преимущественно их употребляют в цепях переменного тока); б) шкала прибора неравномерна, сильно сжата в начальной части.

Достоинством приборов электромагнитной системы могут считаться: простота и надежность конструкции; небольшое собственное потребление мощности.

К недостаткам приборов этой системы следует отнести: невысокую чувствительность к измеряемой величине; относительно низкую точность (класс точности до 1,0); большую чувствительность к внешним магнитным полям.

Некоторые условные обозначения на шкалах приборов представлены в табл. 1.2

Таблица 1.2

Защита от внешних магнитных полей	
Защита от внешних электрических полей	
Горизонтальное положение прибора	
Вертикальное положение прибора	
Класс точности	1,0
Прибор для измерения в цепи постоянного тока	
Прибор для измерения в цепи переменного тока	
Испытательное напряжение изоляции между электрической цепью прибора и корпусом в кВ	

Класс точности

Если обозначить истинное неизвестное нам значение измеряемой величины через X , показание прибора – через x , то абсолютной погрешностью показания прибора называется разность

$$\Delta x = X - x, \quad (1.1)$$

а относительной погрешностью – отношение абсолютной погрешности показания прибора к величине этого показания, выраженное в процентах:

$$E_x = \pm \left(\frac{\Delta x}{x} \right) 100\%. \quad (1.2)$$

Государственными стандартами чаще всего нормируется приведенная погрешность. Класс точности определяет наибольшее допустимое значение приведенной погрешности γ , определяемой по формуле:

$$\gamma = \pm \left(\frac{\Delta x}{x_m} \right) 100\%, \quad (1.3)$$

где x_m – максимальное значение показаний прибора (предел измерения); Δx – максимальная допустимая абсолютная погрешность, принимаемая одинаковой для всех точек шкалы.

Таким образом класс точности – относительная погрешность измерения, выраженная в процентах от установленного предела измерения прибора. Класс точности указывается на шкале или в паспорте прибора. ГОСТом установлены следующие классы точности измерительных приборов: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 4,0 (%).

Расчет погрешностей электрических измерений существенно отличается от расчета погрешностей механических величин.

Пример. Милливольтметр со шкалой до 50 мВ, имеющим класс точности 0,5, измерено напряжение 5,0 мВ. Максимальная абсолютная погрешность при измерениях любого напряжения в пределах от 0 до 50 мВ равна

$$\Delta V = \frac{(\gamma V_m)}{100} \% = \pm (0,5\% * 50 мВ) 100\% = \pm 0,25 мВ$$

Следовательно, относительная погрешность измерения

$$E_v = (\Delta V | V) 100\% = \pm (0,25 / 5,0) 100\% = \pm 5\%.$$

Как следует из определения класса точности, $E_x \geq \gamma$. Поэтому при работе с электроизмерительными приборами следует подбирать такие режимы измерений, при которых показания приборов приходились бы на вторую половину шкалы: это обеспечит меньшую относительную погрешность результата. Так, если в рассмотренном примере воспользоваться милливольтметром со шкалой на 10 мВ даже более низкого класса точности (например, равного 1,5), то абсолютная погрешность будет равна

$$\Delta V = \frac{(\gamma V_m)}{100} \% = \pm \frac{(1,5\% * 10 мВ)}{100} \% = \pm 0,15 мВ,$$

а относительная погрешность

$$E_v = (\Delta V | V) 100\% = \pm \left(\frac{0,15}{5,0} \right) 100\% = \pm 3\%.$$

Следует иметь в виду, что приведенное выше определение класса точности электроизмерительного прибора не применимо ко всевозможным магазинам: магазинам сопротивлений, емкости, индуктивности и т.д. для

всех этих приборов класс точности определяют абсолютную погрешность соответствующей величины, набранной на магазине.

Пример. На магазине сопротивлений РЗЗ, имеющего класс точности 0,2 набрано сопротивление 1,5 кОм. Абсолютная погрешность величины этого сопротивления равна

$$\Delta R = \frac{\gamma R}{100} \% = \pm \frac{0.2\% * 1.5 \text{ кОм}}{100} \% = \pm 3.0 \text{ Ом}$$

Погрешности измерения цифровыми приборами рассчитываются по формулам, которые приводятся в их технической документации. Причем эти формулы различны для разных измеряемых величин и пределов измерений. Например, погрешность измерения цифровым прибором определяется по формуле:

$$E_x = \pm \left[\alpha + \beta \left(\frac{x_m}{x} - 1 \right) \right],$$

α и β – постоянные коэффициенты, зависящие от пределов измерений и рода измеряемой величины, которые приводятся для каждого поддиапазона измерения многопредельной шкалы.

Пределы измерений

Значение измеряемой величины, при котором стрелка прибора отклоняется до конца шкалы, называется пределом измерения этого прибора.

Электроизмерительные приборы могут иметь несколько пределов измерений (так называемые многопредельные приборы). Необходимо помнить, что при измерениях таким прибором на различных пределах цена деления будет различна, поэтому необходимо уметь определять цену деления.

Цена деления прибора C равна значению измеряемой величины x , соответствующей одному делению шкалы прибора. Если стрелка прибора отклонилась на n делений, цена деления прибора может быть найдена, как

$$C = x/n.$$

Пример. Амперметр имеет два предела измерения: 15 и 30 А. Шкала прибора имеет 150 делений. Цена деления для предела 15 А равна $C = 15/150 = 0,1$ А/дел, для предела 30 А цена деления $C = 30/150 = 0,2$ А/дел.

Чувствительность

Чувствительностью S электроизмерительного прибора называется отношение линейного или углового перемещения указателя n к измеряемой величине x , вызвавшей это перемещение, т.е.

$$S = n/x,$$

где n – угловое или линейное перемещение; x – измеряемая величина. Чувствительность прибора $S = 1/C$ – величина, обратная цене деления.

Пример. При измерении тока, равного 2,5 А, указатель прибора изменил свое положение на 50 делений. Следовательно, чувствительность прибора по току равна

$$S_I = \frac{n}{I} = \frac{50}{2.5} = 20 \text{ дел/А.}$$

Изучение амперметра и вольтметра

В данной работе изучаются два типа приборов: амперметр и вольтметр.

Амперметр, служащий для измерения силы тока в цепи, включается в цепь последовательно. Вольтметр, предназначенный для измерения напряжения на участке цепи, включается параллельно к этому участку.

При включении эти приборы не должны вносить заметных изменений в электрическую цепь, чтобы не менять величины измеряемых токов и напряжений. Это значит, что амперметр должен обладать малым сопротивлением, а вольтметр – большим по сравнению с сопротивлением цепи или ее участка.

Электроизмерительные приборы часто имеют несколько пределов измерений. Это достигается использованием шунтов (для амперметров) и дополнительных сопротивлений (для вольтметров).

Шунтом называется сопротивление, подключаемое параллельно к амперметру (рис. 1.2).

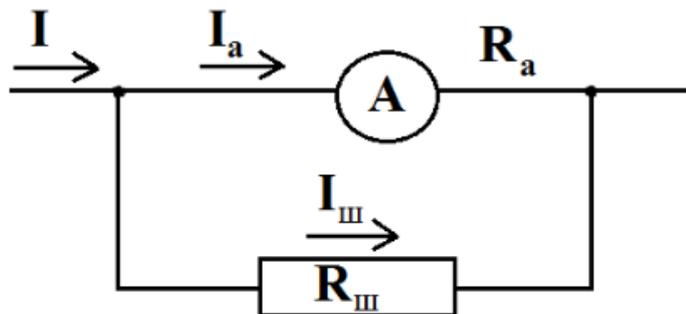


Рис.1.2

При шунтировании только часть тока I_a от измеряемого I ответвляется в прибор и непосредственно измеряется. Остальной ток $I_{ш}$ идет через шунт.

Пусть надо измерить ток I в n раз больший, чем максимально допустимый через прибор ток I_a . Внутреннее сопротивление амперметра R_a известно. Определим, пользуясь законом Ома, сопротивление необходимого шунта $R_{ш}$.

Падения напряжения на амперметре и шунте одинаковы, так как они соединены параллельно:

$$I_{ш}R_{ш} = I_aR_a.$$

Кроме того, $I/I_a = n$.

$$I = I_a + I_{ш};$$

Из этих уравнений находим

$$R_{ш} = R_a/(n - 1). \quad (1.4)$$

Следовательно, для расширения предела измерения амперметра в n раз необходимо, чтобы сопротивление шунта было в $n - 1$ раз меньше сопротивления прибора.

Если шунт изготавливается из провода, то его длину l рассчитывают по формуле

$$l = R_{ш}S/\rho, \quad (1.5)$$

где S – площадь сечения провода; ρ – его удельное сопротивление.

Дополнительным сопротивлением R_d называется сопротивление, подключенное последовательно к вольтметру с сопротивлением R_B для увеличения его предела измерений. В качестве вольтметра может быть использован любой электроизмерительный прибор, проградуированный в единицах напряжения и включаемый параллельно участку цепи, на концах которого измеряется напряжение (рис. 1.3).

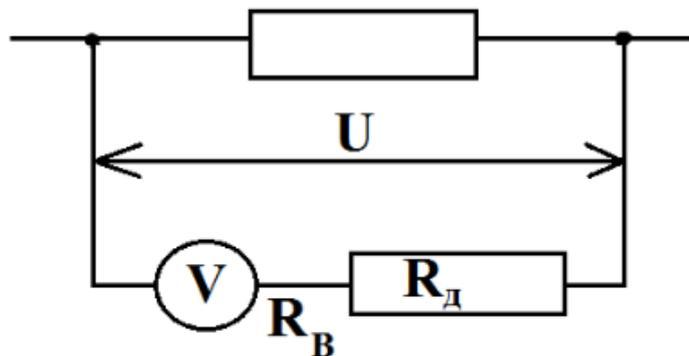


Рис. 1.3

Лабораторная работа № 2

ГРАДУИРОВКА ГАЛЬВАНОМЕТРА

Цель работы

Целью лабораторной работы является ознакомление студентов с методом градуировки электрических приборов и усвоение ими правил Кирхгофа.

Описание установки и метода изучения процесса

Градуировка прибора заключается в определении цены наименьшего деления его шкалы, т.е. той доли A_1 измеряемой величины A , подаваемой на клеммы прибора, которая вызывает отклонение его стрелки на одно деление ($n = 1$) шкалы.

Для градуировки гальванометра по току используется схема рис 2.1, где ε – источник ЭДС с внутренним сопротивлением r ; K – ключ; G – гальванометр; R_1, R_2, R – переменные сопротивления; R_G – сопротивление гальванометра; I_R, I_1, I_2 – токи, протекающие в соответствующих ветвях цепи; $I_G = I_2$ – ток, протекающий через гальванометр.

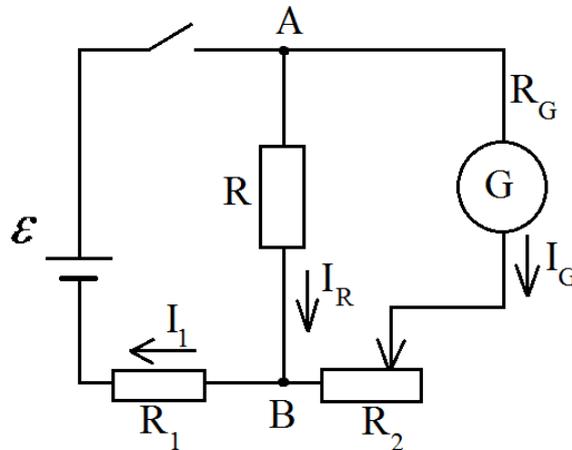


Рис.2.1

Задача сводится к получению экспериментальной зависимости $I_{G_i} = f(n_i)$, где n_i – число делений шкалы, на которое отклоняется стрелка прибора при протекании через него тока I_{G_i} соответствующей величины. Ток I_G , протекающий через гальванометр, определяется выражением

$$I_G = \frac{\varepsilon R}{R(R_G + R_1 + r + R_2) + (R_1 + r)(R_2 + R_G)} \quad (2.1)$$

которое получается в результате решение системы из трех уравнений, составленных на основании первого правила Кирхгофа для узла В и

второго правила Кирхгофа для контуров $\varepsilon AGB\varepsilon$ и $AGBA$ схемы рис.2.1. Как видно из выражения (2.1), при изменении R_2 (при заданных значениях R_1, R, R_G и ε) будет изменяться I_G , а следовательно, и величина отклонения стрелки прибора.

Предварительное задание

Каждый студент должен:

- 1) с помощью учебников [1] или [2] изучить правила Кирхгофа;
- 2) на основании первого правила Кирхгофа для узла В и второго правила Кирхгофа для контуров $\varepsilon AGB\varepsilon$ и $AGBA$ (рис.2.1) записать три уравнения и вывести формулу (2.1);
- 3) подготовить таблицу 2.1 для записи экспериментальных и расчетных данных.

Таблица 2.1

N_0	R_2	n	I	C	S

Рабочее задание

В работе требуется самостоятельно осуществить экспериментальную градуировку гальванометра.

Указания по технике безопасности

1. Работайте только с установкой, указанной преподавателем.
2. Не прикасайтесь к оголенным контактам включенного в сеть электроизмерительного прибора.
3. Если неизвестен порядок измеряемой величины, то включайте приборы на максимальный предел измерений.
4. Включайте источник только после того, как схему проверит преподаватель.
5. Не оставляйте включенную установку без наблюдения.
6. После окончания работы не забудьте выключить установку.

Указания по выполнению эксперимента.

Перед выполнением задания необходимо ознакомиться с приборами экспериментальной установки.

В работе в качестве переменных сопротивлений $R, R_1,$ и R_2 используются разрядные магазины сопротивлений, изменять которые

можно ступенями, поворачивая соответствующие ручки для единиц, для десятков, сотен и тысяч Ом.

1. Запишите значения сопротивлений с передней панели установки: $R=500$ Ом, $R_1=60$ Ом, $R_G=130$ Ом.
2. Установите сопротивление R_2 на 900 Ом. Включите установку.
3. Уменьшая R_2 от 900 Ом с шагом 100 Ом, получите ряд значений (в данном случае 10 значений) n и R_2 и запишите их в таблицу 2.1. Изменение R_2 проводится до достижения максимального значения n на приборе при $R_2 = 0$.
4. Запишите параметры источника: внутреннее сопротивление источника $r = 90$ Ом, ЭДС батареи $\varepsilon = 5$ В.

Указания по обработке результатов эксперимента

Рассчитайте значения I_{G_i} по формуле (2.1), используя табличные данные для R_2 , а также значения R_G , ε , r , R_1 и R . Полученные значения занесите в табл.2.1.

Используя миллиметровую бумагу, постройте график зависимости $I_{G_i} = f(n_i)$, проведя усредненную прямую через экспериментальные точки.

Для каждой экспериментальной точки рассчитайте цену деления C_i шкалы гальванометра по формуле

$$C_i = I_{G_i}/n_i,$$

и запишите полученные значения в таблицу 2.1. Рассчитайте среднюю цену деления $\bar{C} = \sum C_i/n_{\text{изм}}$. Число измерений определяется числом возможных значений R_2 и в нашем случае равно $n_{\text{изм}} = 10$. Затем вычислите абсолютную погрешность ΔC в определении величины C по формуле

$$\Delta C = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2}{n_{\text{изм}}(n_{\text{изм}} - 1)}}.$$

Определите значение чувствительности S_i по формуле

$$S_i = 1/C_i$$

и запишите в таблицу 2.1. Найдите среднюю чувствительность $\bar{S} = \sum S_i/n_{\text{изм}}$ и рассчитайте абсолютную погрешность в определении чувствительности по формуле:

$$\Delta S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}{n_{\text{изм}}(n_{\text{изм}} - 1)}}.$$

Результаты вычислений представьте в виде:

$$C = \bar{C} \mp \Delta \bar{C}$$

$$S = \bar{S} \mp \Delta \bar{S}$$

Указания по оформлению отчета

Отчет оформляется каждым студентом индивидуально и должен содержать:

- а) номер и название работы;
- б) цель работы;
- в) краткую теорию изучаемого вопроса;
- г) основные характеристики измерительных приборов;
- д) записи результатов прямых измерений и расчетов косвенных измерений, оформленные в виде таблицы;
- г) графики полученных зависимостей;
- д) запись вычислений, приводящих к окончательному результату;
- е) расчет ошибок измерений;
- ж) окончательный результат с указанием ошибки измерения;
- з) выводы.

Все графики должны быть выполнены на миллиметровой бумаге. При расчетах необходимо использовать единицы системы СИ.

Контрольные вопросы

1. Что значит проградуировать прибор?
2. Сформулируйте правила Кирхгофа.
3. Почему стрелка гальванометра стоит на нулевом делении шкалы, когда $R = 0$? Докажите это, применив второе правило Кирхгофа.
4. Что нужно сделать, чтобы отклонить стрелку гальванометра до предельного значения шкалы, если она туда не отклонилась при максимальном R ?
5. Где будет находиться стрелка прибора, если $R_1=R_2=0$, а $R \neq 0$?
6. Что может произойти с гальванометром в том случае, если ЭДС источника достаточно большая величина?

Литература

1. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Академия, 2008. 560 с.
2. Бондарев Б.В., Калашников Н.П., Спириин Г.Г. Курс общей физики. Книга 1. Механика Книга 2: Электромагнетизм. Оптика. Квантовая физика. М.: Академия, 2014 г. 441 с.

Лабораторная работа № 3

ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ РЕЗИСТОРОВ МОСТОВЫМ
МЕТОДОМЦель работы

Целью лабораторной работы является освоение студентами метода измерения сопротивлений с помощью моста Уитстона.

Описание установки и метода изучения процесса

Принципиальная электрическая схема 4-плечного моста Уитстона представлена на рис. 3.1.

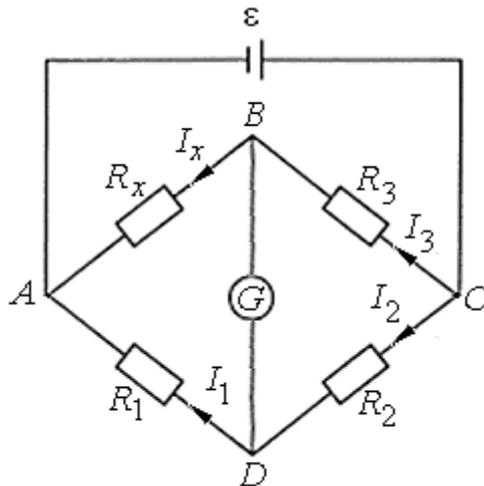


Рис. 3.1

Плечи образованы резисторами R_1 , R_2 , R_3 , R_x , по которым протекают, соответственно, токи I_1 , I_2 , I_3 , I_x . В диагональ AC моста включен источник ЭДС ε , в диагональ BD – гальванометр G . Сопротивления резисторов можно подобрать таким образом, что точки B и D будут иметь одинаковый потенциал. В этом случае мост будет сбалансирован (уравновешен), поскольку ток через гальванометр протекать не будет.

Для расчета цепи используем правила Кирхгофа. Первое правило Кирхгофа говорит о том, что алгебраическая сумма токов, входящих в узел, равна нулю:

$$\sum I_i = 0. \quad (3.1)$$

Применяя это правило к узлам B и D , и учитывая, что ток через гальванометр не течет, имеем

$$I_1 = I_2, \quad I_3 = I_x. \quad (3.2)$$

Второе правило Кирхгофа, которое может быть записано для любого, мысленно выделенного, замкнутого контура, говорит о том, что алгебраическая сумма падений напряжений в контуре равна алгебраической сумме ЭДС, действующих в этом контуре:

$$\sum I_i R_i = \sum \varepsilon_k. \quad (3.3)$$

Применяя это правило к замкнутым контурам ABD и BCD , и учитывая, то ток через гальванометр не течет, имеем

$$I_1 R_1 - I_x R_x = 0, \quad I_3 R_3 - I_2 R_2 = 0. \quad (3.4)$$

Учитывая связь (3.2), существующую между токами, получим

$$I_1 R_1 = I_3 R_x, \quad I_3 R_3 = I_1 R_2, \quad (3.5)$$

что приводит к соотношению, позволяющему рассчитать неизвестное сопротивление

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_3. \quad (3.6)$$

В экспериментальной установке, электрическая схема которой представлена на рис. 3.2, в качестве переменных сопротивлений R_1 и R_2 используются проволочные сопротивления, величина которых пропорциональна их длине. Общая длина демонстрационного моста равна одному метру.

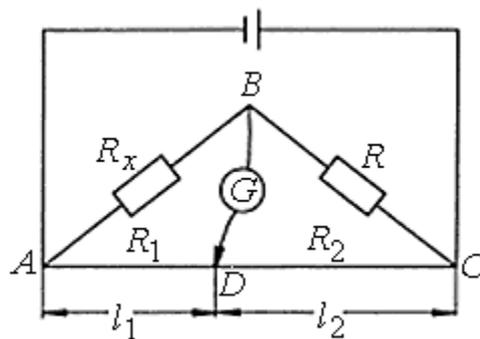


Рис. 3.2

Изменение положения передвижного контакта (точки D) приводит к изменению отношения сопротивлений $R_1/R_2 = l_1/l_2$. В том положении, при котором мост сбалансирован, и ток через гальванометр не течет, справедливо соотношение

$$R_x = \frac{l_1}{l_2} R, \quad (3.7)$$

которое может быть использовано для расчета неизвестного сопротивления R_x . Итак, процесс измерения неизвестного сопротивления заключается в балансировке моста и расчету искомого сопротивления по формуле (3.7) через известное сопротивление R и найденные плечи l_1 и l_2 .

Предварительное задание

Каждый студент должен:

- 1) повторить законы Ома и правила Кирхгофа;
- 2) изучить принцип измерения сопротивления мостовым методом;
- 3) вывести формулу (3.7) для расчета неизвестного сопротивления;
- 4) повторить формулы для вычисления сопротивлений, соединенных последовательно и параллельно;
- 5) составить таблицу для записи экспериментальных данных.

Рабочее задание

В работе требуется с помощью демонстрационного моста Уитстона измерить сопротивления резисторов R_{x_1} и R_{x_2} в отдельности и при их последовательном и параллельном соединении.

Указания по технике безопасности

Требования по технике безопасности соответствуют требованиям работы № 2.

Указания по выполнению эксперимента

1. Ознакомьтесь с устройством демонстрационного моста Уитстона.
2. Получите два измеряемых резистора (белого цвета), посмотрите порядок их величины, который указан на приборах.
3. С помощью соединенных проводов для измерения сопротивления R_{x_1} соберите электрическую схему, согласно рис. 3.2. При этом учтите, что известное сопротивление декадного резистора R (черного цвета) подбирается из имеющихся четырех декадных резисторов. Оно должно быть того же порядка, что и сопротивление измеряемого резистора R_{x_1} (белого цвета). В источнике питания используйте выход 5 В.

4. Установите перемещаемый контакт примерно в середину моста; поставьте тумблер гальванометра на 3 мА.
5. Включите в сеть (220 В) источник питания постоянного тока.
6. Перемещая контакт, найдите положение, при котором стрелка гальванометра установится в нулевом положении.
7. Измерьте плечо l_1 по левой стороне контакта, l_2 найдите из соотношения $l_1 + l_2 = L = 1$ м.
8. Запишите результаты измерений в таблицу.
9. Прделайте те же измерения для другого неизвестного резистора R_{x2} , а затем для последовательного и параллельного соединений этих резисторов.

Указания по обработке результатов измерений

1. Используя найденные значения l_1 и l_2 по формуле (3.7) рассчитайте экспериментально полученную величину обоих неизвестных сопротивлений по отдельности, а также при их последовательном и параллельном соединении.
2. Используя экспериментально определенные значения неизвестных сопротивлений, по формулам рассчитать теоретические значения сопротивлений при их последовательном и параллельном соединениях.
3. Вычислите абсолютные и относительные отклонения теоретически рассчитанных значений от экспериментально найденных.
4. Сделайте вывод о точности измерения сопротивлений мостовым методом.

Указания по оформлению отчета

Требования по оформлению отчета соответствуют требованиям работы № 2.

Контрольные вопросы

1. Запишите закон Ома для неоднородного участка цепи.
2. Сформулируйте правила Кирхгофа.
3. Получите условие равновесия моста.
4. В чем состоит принцип мостовых измерений?
5. Как рассчитывается общее сопротивление при последовательном и параллельном соединении резисторов?

Литература

1. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Академия, 2008. 560 с.
2. Бондарев Б.В., Калашников Н.П., Спириин Г.Г. Курс общей физики. Книга 2: Электромагнетизм. Оптика. Квантовая физика. М.: Академия, 2014 г. 441 с.

Лабораторная работа № 4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ОБОБЩЕННОГО ЗАКОНА ОМА (схема с одним источником ЭДС)

Цель работы

Целью лабораторной работы является углубленное изучение студентами обобщенного закона Ома, применение его для анализа и расчета параметров простых электрических цепей.

Описание установки и метода изучения процесса

Установка, используемая в работе, выполнена в виде стенда, на котором смонтированы магазины сопротивлений, миллиамперметр mA, вольтметр V, переменное сопротивление R_2 , выключатели B_1 и B_2 . Источник ЭДС ε подключается к стенду извне. Электрическая схема установки с необходимыми элементами стенда изображена на рис. 4.1.

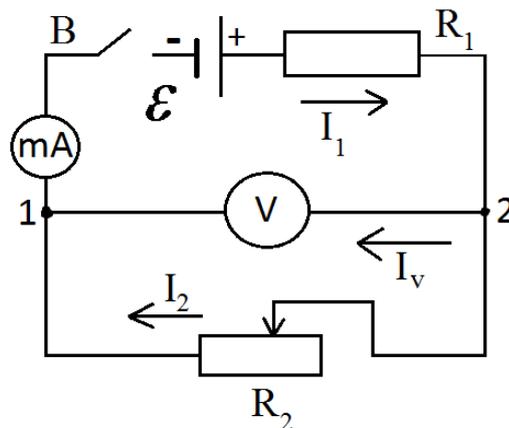


Рис. 4.1

В любой электрической цепи постоянного тока можно выделить однородные и неоднородные участки. Участок цепи, на котором на

носители тока не действуют сторонние силы, называется однородным. Участок, на котором на носители тока действуют сторонние силы, называется неоднородным. В схеме, представленной на рис. 4.1, участки (1V2) и (1R22) являются однородными, участок (1εR12) – неоднородным, т.е. на однородных участках цепи источники ЭДС отсутствуют ($\varepsilon = 0$). На однородных участках цепи на носители тока действуют силы электростатического кулоновского поля $\overline{F_E} = q\overline{E}$, на неоднородных участках, наряду с ними, действуют и силы стороннего поля $\overline{F_{ст}} = q\overline{E_{ст}}$ – силы неэлектростатической природы.

Результирующая сила \overline{F} , действующая на заряд q на неоднородном участке, равна

$$\overline{F} = \overline{F_E} + \overline{F_{ст}} = q(\overline{E} + \overline{E_{ст}}), \quad (4.1)$$

где \overline{E} и $\overline{E_{ст}}$ – напряженности полей электростатических и сторонних сил.

Работа A , совершаемая этой силой над зарядом q , определяется выражением

$$A_{12} = q \int_1^2 \overline{E} d\bar{l} + q \int_1^2 \overline{E_{ст}} d\bar{l} = q(\varphi_1 - \varphi_2) + q\varepsilon_{12} = qU_{12} \quad (4.2)$$

Здесь φ_1 и φ_2 – электрические потенциалы в точках 1 и 2 соответственно.

Величина, численно равная работе, совершаемой электростатическими и сторонними силами при перемещении единичного положительного заряда, называется напряжением U_{12} на данном участке цепи:

$$U_{12} = \frac{A_{12}}{q} = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12} \quad (4.3)$$

Для однородного участка цепи напряжение совпадает с разностью потенциалов на концах участка.

Представив напряжение U_{12} как произведение силы тока I , протекающего по участку, на полное сопротивление R участка, приходим к формуле

$$IR = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12} \quad (4.4)$$

ЭДС ε_{12} , как и сила тока I , есть величина алгебраическая. В случае, когда ЭДС способствует движению положительных носителей тока в выбранном направлении (1→2), (т.е. направление от «-» к «+» внутри источника совпадает с ним), $\varepsilon_{12} > 0$. Если ЭДС препятствует движению положительных носителей в данном направлении, $\varepsilon_{12} < 0$.

Выражение (4.4) может быть записано в виде

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}}{R} \quad (4.5)$$

Эта формула выражает закон Ома для неоднородного участка цепи – обобщенный закон Ома.

Положив в (4.5) $\varphi_1 = \varphi_2$, получим выражение закона Ома для замкнутой цепи:

$$I = \frac{\varepsilon}{R} \quad (4.6)$$

где ε - ЭДС, действующая в цепи; R – суммарное сопротивление всей цепи.

В выражении (4.6) отсутствует разность потенциалов, поскольку вся работа в замкнутой цепи совершается только за счет энергии источника сторонних сил, действующих на внутреннем участке: в гальваническом элементе – за счет химической энергии, термобатареи – за счет энергии теплового движения, в генераторе постоянного тока – за счет механической работы при вращении якоря в магнитном поле и т.д. Электростатическое поле, совершая положительную работу на внешнем участке цепи, где оно «проталкивает» носители типа через кристаллическую решетку, и такую же по абсолютному значению, но отрицательную по знаку при торможении носителей тока на внутреннем участке цепи (внутри источника), в итоге не совершает никакой работы в замкнутой цепи, и служит лишь промежуточным звеном в тех превращениях энергии, которые происходят в цепи.

Обратимся к нашей схеме (рис. 4.1). Направление тока в цепи с одним источником ЭДС определяется однозначно – он течет от положительного полюса источника к отрицательному на внешних участках цепи и от отрицательного к положительному внутри источника. Если учесть, что ток I_V через вольтметр мал по сравнению с токами I_1 и I_2 через сопротивления R_1 и R_2 ввиду их малости по сравнению с внутренним сопротивлением R_V вольтметра, то можно считать токи I_1 и I_2 практически одинаковыми и ток, протекающий по цепи, равным I , т.е. $I_1 = I_2 = I$. Этот ток по закону Ома для замкнутой цепи ($I\varepsilon R, 2R_2I$) определяется следующим выражением:

$$I = \frac{\varepsilon}{R_1 + r + R_2 + R_A}, \quad (4.7)$$

где r – внутреннее сопротивление источника тока, R_A – сопротивление миллиамперметра.

Проверка обобщенного закона Ома в данной работе осуществляется для участка электрической цепи ($I\varepsilon R_1 2$). Для него, по аналогии с (4.5), запишем

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon}{R_1 + r + R_A} \quad (4.8)$$

Представим (4.9) в виде, удобном для анализа изменений тока в цепи и разности потенциалов на концах рассматриваемого участка цепи:

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \varepsilon - I(R_1 + r + R_A) \quad (4.9)$$

Внешняя к рассматриваемому участку ($1 \varepsilon R_1 2$) часть цепи содержит переменное сопротивление (магазин сопротивлений) R_2 , с помощью которого можно изменять силу тока I и разность потенциалов $U = \varphi_2 - \varphi_1$ в цепи, т.е. осуществлять переход от одного стационарного режима цепи к другому.

Формально, не вдаваясь в физическую сущность процессов, происходящих при этом на внешнем и внутреннем участках цепи, эти изменения тока I и разности потенциалов $(\varphi_2 - \varphi_1) = U$ могут быть проанализированы с помощью выражений (4.7) и (4.9). Из (4.7) следует, что при увеличении (уменьшении) сопротивления R_2 ток I в цепи соответственно уменьшается (увеличивается), что приводит, как это видно из (4.9), к увеличению (уменьшению) разности потенциалов $(\varphi_2 - \varphi_1) = U$ на концах рассматриваемого участка и внешней по отношению к нему части цепи, содержащей R_2 . Осуществится переход к новому стационарному режиму.

Зависимость разности потенциалов на концах участка ($1 \varepsilon R_1 2$), измеряемой вольтметром, от тока, протекающего по этому участку, описывается уравнением прямой, т.е. является линейной.

Действительно, уравнение (4.9), приведенное к виду

$$U = \varphi_2 - \varphi_1 = -(R_1 + r + R_A)I + \varepsilon \quad (4.11)$$

аналогично уравнению прямой типа

$$y = -kx + b.$$

Экспериментальное получение этой линейной зависимости и будет подтверждением справедливости обобщенного закона Ома.

Предварительное задание

Каждый студент должен:

1) изучить по [1] закон Ома и записать его для однородных и неоднородных участков схемы рис. 4.1;

- 2) уяснить такие понятия, как напряжение, разность потенциалов, ЭДС источника;
- 3) получить из закона Ома (4.9) формулу для расчета внутреннего сопротивления источника тока;
- 4) подготовить таблицу 4.1 для записи результатов измерений.

Таблица 4.1

№	R_2	I		U	
		дел	mA	дел	V

Рабочее задание

В работе требуется самостоятельно осуществить экспериментальную проверку обобщенного закона Ома.

Указания по технике безопасности

Требования по технике безопасности соответствуют требованиям работы № 2.

Указания по выполнению эксперимента

Перед выполнением задания ознакомьтесь со всеми элементами стенда, входящими в электрическую схему (R_1 , R_2 , mA, V), с тумблерами на его передней и верхней панелях и их назначением. Измерения проводятся при значении $R_1=120$ Ом. Для выполнения эксперимента:

1. Установите ручку рычажного переключателя магазина сопротивлений в положение «0». Тумблер B в исходном состоянии должен находиться в положении «Выкл.» (нижнее положение);
2. Определите цену деления миллиамперметра (предел измерения – 30 mA) и вольтметра (предел измерения – 15 V);
3. Включите тумблер B и, изменяя сопротивление R_2 от 0 до 900 Ом с шагом 100 Ом, снимите показания миллиамперметра mA и вольтметра V в делениях шкал приборов;
4. Результаты измерений занесите в таблицу;
5. Отключите стенд от источника питания.

Указания по обработке результатов измерений

1. Результаты измерений тока I и разности потенциалов $U = (\varphi_2 - \varphi_1)$ выразите, соответственно, в миллиамперах и вольтах и также занесите в таблицу;

2. На миллиметровой бумаге постройте график зависимости $U = f(I)$ для проведенного опыта, проведя усредненную прямую через экспериментальные точки. Проанализируйте характер этой зависимости и убедитесь в ее линейности;
3. Прозэкстраполируйте зависимость, доведя полученную прямую до пересечения с вертикальной осью U . Найдите значение ЭДС источника, определив точку пересечения прямой с осью U ;
4. Рассчитайте по формуле, полученной в предварительном задании, внутреннее сопротивление источника r , используя полученное значение ε , а также значения I и U при $R_2 = 400$ Ом. Сопротивление амперметра взять равным $R_A = 130$ Ом;
5. Сделайте выводы о причинах возможных расхождений значений ε и r в проведенном опыте.

Указания по оформлению отчета

Требования по оформлению отчета совпадают с требованиями, изложенными в работе № 2.

Контрольные вопросы

1. В чем физический смысл понятий напряжения, разности потенциалов, ЭДС источника?
2. Как определяется знак ЭДС источника тока?
3. Напишите закон Ома для участков схемы рис. 4.1 ($1\varepsilon R_1 2$), ($1R_2 2$) и для замкнутой цепи.
4. Каков физический смысл точек пересечения зависимости $U = f(I)$ с осями I и U ?
5. Покажите, используя выражение (4.8) и (4.9), что при $R_2=0$ разность потенциалов $U = (\varphi_2 - \varphi_1) = 0$, т.е. ток через вольтметр не идет. Объясните, почему это происходит.

Литература

1. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Академия, 2008. 560 с.
2. Бондарев Б.В., Калашников Н.П., Спириин Г.Г. Курс общей физики. Книга 2: Электромагнетизм. Оптика. Квантовая физика. М.: Академия, 2014 г. 441 с.

Лабораторная работа № 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ И ПЕРЕВОДНОГО МНОЖИТЕЛЯ ТАНГЕНС – ГАЛЬВАНОМЕТРА

Цель работы

Целью работы является ознакомление студентов с прибором, называемым тангенс – гальванометром, и изучение возможностей определения горизонтальной составляющей магнитного поля Земли с помощью этого прибора.

Описание установки и метода изучения процесса

Основной частью тангенс-гальванометра является плоская катушка, закрепленная в вертикальной плоскости. В центре катушки расположена горизонтальная магнитная стрелка с указателем и шкалой, проградуированной в градусах. По катушке может быть пропущен электрический ток, и это вызывает отклонение стрелки от положения равновесия. Схема прибора приведена на рис. 5.1.

Тангенс-гальванометр состоит из катушки K , магнитной стрелки MC , источника ЭДС ε , реостата R , миллиамперметра mA , переключателя полярности тока Π и выключателя B .

При отсутствии тока в катушке магнитная стрелка находится в равновесии и расположена вдоль силовых линий магнитного поля Земли, которые составляют с горизонтом некоторый угол, называемый углом магнитного наклона. Поскольку стрелка может вращаться вокруг вертикальной оси, то она приходит в положение равновесия под действием только горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли $\overline{B}_Г$.

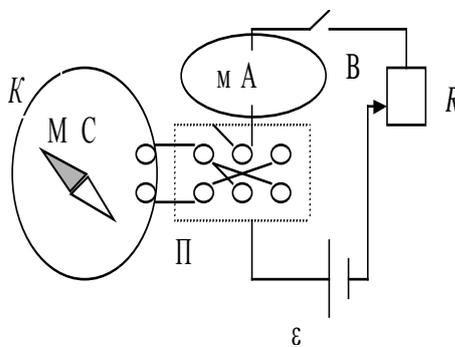


Рис. 5.1

Как только в катушке потечет ток, он создаст дополнительное магнитное поле с индукцией \overline{B}_k , величина которой определяется параметрами катушки и значением тока. Тогда магнитная стрелка займет новое положение равновесия под действием суммарного магнитного поля

$$\overline{B} = \overline{B}_T + \overline{B}_k.$$

Поворотом катушки около вертикальной оси можно добиться совмещения ее плоскости с плоскостью магнитного меридиана Земли. Положение магнитной стрелки в этом случае показано на рис. 5.2.

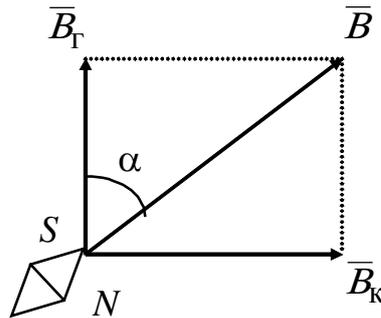


Рис. 5.2

Из рис. 5.2 видно, что горизонтальная составляющая индукции магнитного поля Земли \overline{B}_T связана с полем катушки соотношением

$$B_T = \frac{B_k}{\operatorname{tg}\alpha}. \quad (5.1)$$

В свою очередь величина индукции магнитного поля катушки B_k рассчитывается по закону Био-Савара-Лапласа и равна

$$B_k = \frac{\mu_0 NI}{2R}, \quad (5.2)$$

где N - число витков катушки; I - сила тока в витках, R - радиус витка, μ_0 - магнитная постоянная вакуума, равная $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Учитывая (5.2), можно получить рабочую формулу для расчета B_T :

$$B_T = \frac{\mu_0 NI}{2R \operatorname{tg}\alpha}, \quad (5.3)$$

которая позволяет определить силу тока в катушке I :

$$I = \frac{2RB_T \operatorname{tg}\alpha}{\mu_0 N}. \quad (5.4)$$

Если ввести обозначение

$$C = \frac{2B_r R}{\mu_0 N}, \quad (5.5)$$

формула (5.4) примет вид

$$I = C \operatorname{tg} \alpha. \quad (5.6)$$

Величина C является характеристикой прибора и называется постоянной тангенс-гальванометра. Поскольку угол отклонения пропорционален протекающему току, этот прибор может быть использован для измерения электрического тока.

Предварительное задание

Каждый студент должен изучить закон Био – Савара – Лапласа [1] и ознакомиться с тангенс – гальванометром, а также подготовить таблицу 5.1. для записи зависимости угла отклонения магнитной стрелки от величины тока в катушке.

Таблица 5.1.

№	α'	α''	α	B_r	C

Рабочее задание

1. Определите зависимость угла отклонения стрелки от величины и направлении тока в катушке.
2. Вычислите постоянную тангенс - -гальванометра C .
3. Вычислите величину горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли B_r .

Указания по технике безопасности

Требования по технике безопасности соответствуют требованиям работы № 2.

Указания по выполнению эксперимента

1. Поворотом корпуса прибора установите катушку тангенс-гальванометра в плоскости магнитного меридиана Земли. Для этого надо совместить плоскость катушки с направлением магнитной стрелки.
2. Установите магнитную стрелку на 0° по круговой шкале.
3. Включите прибор и установите произвольное небольшое значение тока с помощью ручки регулировки. Измерьте величину отклонения стрелки в градусах (α'), дождавшись, когда стрелка прекратит колебания.

5. Не меняя величины тока, измените его полярность с помощью переключателя П. Измерьте величину отклонения стрелки в градусах (α''). При правильной установке катушки тангенс-гальванометра относительно магнитного поля Земли эти отклонения будут примерно одинаковыми.

5. Занесите результаты измерений в таблицу.

6. Измените значение тока, немного его увеличив, и повторите указанные действия.

7. Сделайте измерения для пяти значений тока, последнее измерение проведите при максимальном значении тока.

Указания по обработке результатов измерений

1. Получите усредненные значения углов отклонения α для токов одной величины, но различной полярности по формуле

$$\alpha_j = \frac{\alpha'_j + \alpha''_j}{2}. \quad (5.7)$$

2. Вычислите для каждого значения тока величину B_Γ по формуле (5.3).

3. Вычислите для каждого значения тока величину C по формуле (5.5).

4. При вычислениях используйте значения величин R и N , приведенные на верхней панели тангенс-гальванометра.

5. Вычислите средние значения \bar{B}_Γ и \bar{C} .

6. Вычислите абсолютные погрешности ΔB_Γ и ΔC , используя следующие формулы, полученные при условии $\Delta\mu_0 = \Delta N = 0$:

$$\Delta B_\Gamma = \bar{B}_\Gamma \sqrt{\left(\frac{\Delta I}{\bar{I}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{\bar{R}}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta\alpha}{\sin 2\alpha}\right)^2}; \quad (5.8)$$

$$\Delta C = \sqrt{\left(\frac{\Delta I}{\operatorname{tg}\alpha}\right)^2 + \left(\frac{I\Delta\alpha}{\sin^2\alpha}\right)^2} = \bar{C} \sqrt{\left(\frac{\Delta I}{\bar{I}}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta\alpha}{\sin 2\alpha}\right)^2}. \quad (5.9)$$

7. При вычислении погрешностей используйте следующие данные: величину ΔI определите по классу точности миллиамперметра, $\Delta\alpha = 0,009$ рад, $\Delta R = 0,005$ м.

8. Запишите окончательные результаты в виде:

$$B_\Gamma = \bar{B}_\Gamma \pm \Delta B_\Gamma, \quad C = \bar{C} \pm \Delta C.$$

9. Постройте график зависимости $I=f(\operatorname{tg}\alpha)$ и проанализируйте его, сравнив с расчетной зависимостью (5.6).

10. Сделайте выводы.

Указания по оформлению отчета

Требования по оформлению отчета совпадают с требованиями, изложенными в работе № 2.

Контрольные вопросы

1. Что такое индукция магнитного поля?
2. Почему магнитная стрелка отклоняется при пропускании тока через катушку?
3. Для чего в начале работы необходимо установить катушку тангенс-гальванометра в плоскости магнитного меридиана Земли?
4. Как направлено магнитное поле в центре кругового проводника с током?
5. Почему направление отклонения стрелки меняется при изменении полярности тока катушки?

Литература

1. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Академия, 2008. 560 с.
2. Бондарев Б.В., Калашников Н.П., Спириин Г.Г. Курс общей физики. Книга 2: Электромагнетизм. Оптика. Квантовая физика. М.: Академия, 2014 г. 441 с.

Лабораторная работа № 6

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МОЩНОСТИ И КПД ИСТОЧНИКА ПОСТОЯННОГО ТОКА ОТ ВНЕШНЕЙ НАГРУЗКИ (компьютерный вариант)

Цель работы

Знакомство с компьютерным моделированием цепей постоянного тока. Исследование зависимости мощности и КПД источника постоянного тока от сопротивления внешней цепи на основе компьютерного моделирования.

Описание установки и метода изучения процесса

В данной работе с помощью методов компьютерного моделирования исследуется цепь постоянного тока, состоящая из источника тока, обладающего определенным внутренним сопротивлением, замкнутого на внешнее сопротивление, величина которого может меняться в определенных пределах (рис. 6.1а). Замкнутая цепь, общий вид которой

изображен на рис.6.1а, собирается из отдельных элементов на экране компьютера (например, для первого варианта она соответствует рис. 6.1б). Расчет параметров цепи проводится на основе закона Ома для полной цепи:

$$I = \frac{E}{R + r}, \quad (6.1)$$

Здесь I - сила тока в цепи; E - электродвижущая сила (ЭДС) источника тока, включённого в цепь; R - сопротивление внешней цепи (для рис. 6.1б – это суммарное сопротивление двух нижних резисторов); r - внутреннее сопротивление источника тока (для рис. 6.1б – это верхнее сопротивление, находящееся рядом с источником).

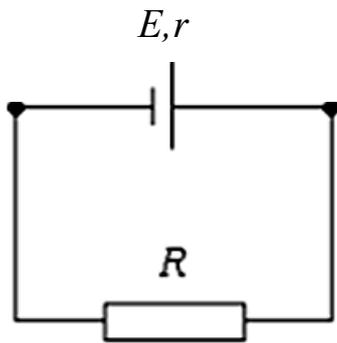


Рис. 6.1а

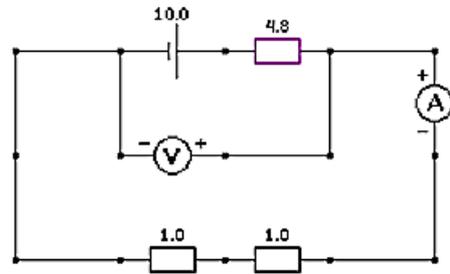


Рис. 6.1б

Мощность, выделяемая во внешней цепи, находится, как

$$P_1 = I^2 R = \frac{E^2}{(R + r)^2} R. \quad (6.2)$$

Из формулы (6.2) видно, что при коротком замыкании цепи ($R \rightarrow 0$) и при $R \rightarrow \infty$ эта мощность равна нулю. При всех других конечных значениях R мощность $P_1 > 0$. Следовательно, функция P_1 имеет максимум. Значение R_0 , соответствующее максимальной мощности, можно получить, дифференцируя P_1 по R и приравнявая первую производную к нулю:

$$\frac{dP_1}{dR} = \frac{E^2 \left[(R_0 + r)^2 - 2(R_0 + r)R \right]}{(R_0 + r)^4} = 0. \quad (6.3)$$

Из формулы (6.3), с учётом того, что R и r всегда положительны, а $E \neq 0$, после несложных алгебраических преобразований получим:

$$R_0 = r. \quad (6.4)$$

Следовательно, мощность, выделяемая во внешней цепи, достигает наибольшего значения при сопротивлении внешней цепи, равном внутреннему сопротивлению источника тока. При этом сила тока в цепи

$$I = \frac{E}{2r} = \frac{I_{кз}}{2} \quad (6.5)$$

равна половине тока короткого замыкания, а мощность, выделяемая во внешней цепи, достигает своего максимального значения, равного

$$P_{1\max} = \frac{E^2}{4r}. \quad (6.6)$$

Когда источник замкнут на внешнее сопротивление, то ток протекает и внутри источника и при этом на внутреннем сопротивлении источника выделяется некоторое количество тепла. Мощность, затрачиваемая на выделение этого тепла, равна

$$P_2 = I^2 r. \quad (6.7)$$

Следовательно, полная мощность, выделяемая во всей цепи, определится формулой

$$P_{\text{полн}} = P_1 + P_2 = I^2 R + I^2 r = I^2 (R+r) = IE \quad (6.8)$$

Коэффициент полезного действия (КПД) источника тока равен

$$\eta = \frac{P_1}{P_{\text{полн}}} = \frac{R}{R+r}. \quad (6.9)$$

Из формулы (6.8) следует, что

$$P_1 = P_{\text{полн}} - P_2 = EI - I^2 r, \quad (6.10)$$

т.е. P_1 изменяется с изменением силы тока в цепи по параболическому закону и принимает нулевые значения при $I = 0$ и при $I = \frac{E}{r}$. Первое

значение соответствует разомкнутой цепи ($R \gg r$), второе – короткому замыканию ($R \ll r$). Зависимость КПД от силы тока в цепи с учётом формул (6.8), (6.9), (6.10) примет вид

$$\eta = 1 - \frac{r}{E} I. \quad (6.11)$$

Таким образом, КПД достигает наибольшего значения $\eta = 1$ в случае разомкнутой цепи ($I = 0$), а затем уменьшается по линейному закону, обращаясь в нуль при коротком замыкании.

Зависимость мощностей P_1 , $P_{\text{полн}} = EI$ и КПД источника тока от силы тока в цепи показаны на рис. 6.2.

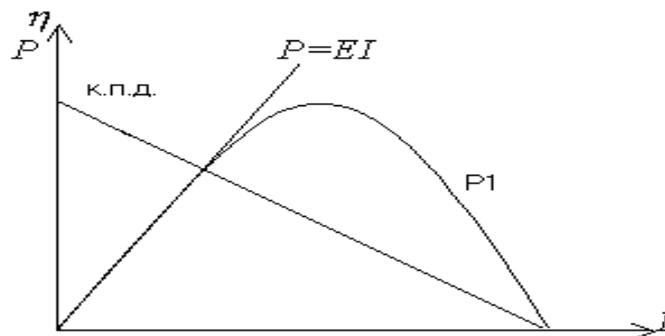


Рис. 6.2

Из графиков видно, что получить одновременно полезную мощность и КПД невозможно. В тот момент, когда мощность P_1 , выделяемая на внешнем участке цепи, достигает наибольшего значения, КПД равен 50%.

Предварительное задание

Каждый студент должен:

- 1) используя указанную литературу, изучить закон Ома для замкнутой цепи и вывести уравнения для расчета мощности во всей цепи и на отдельных ее участках;
- 2) найти зависимость КПД источника от силы тока в цепи;
- 3) рассчитать максимальное значение мощности, выделяемой во внешней цепи;
- 4) подготовить таблицу 6.1 для записи результатов измерений.

Таблица 5.1.

R , Ом	2,0	2,5	3,0	...			20,0
U , В							
I , А							
P_1 , Вт							
P_2 , Вт							
$P_{\text{полн}}$, Вт							
η							

Рабочее задание

В работе требуется смоделировать замкнутую цепь с заданными параметрами и рассчитать мощности различных участков рассматриваемой замкнутой цепи

Указания по технике безопасности

Требования по технике безопасности соответствуют требованиям работы № 2.

Указания по выполнению эксперимента

1. Включите компьютерные лабораторные работы «Открытая физика». Выберите раздел «Электричество и магнетизм». Откройте «Цепи постоянного тока».

2. Выясните у преподавателя Ваш номер варианта исходных параметров электрической цепи.

Таблица 6.2.

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8
$E, \text{В}$	10,0	9,5	9,0	8,5	8,0	8,5	9,0	9,5
$r, \text{Ом}$	4,8	5,7	6,6	7,5	6,4	7,3	8,2	9,1

3. Выбрав из таблицы 6.2 значения E и r , соответствующие вашему варианту, соберите на экране по схеме, приведенной на рис. 6.3, цепь с вашими параметрами.

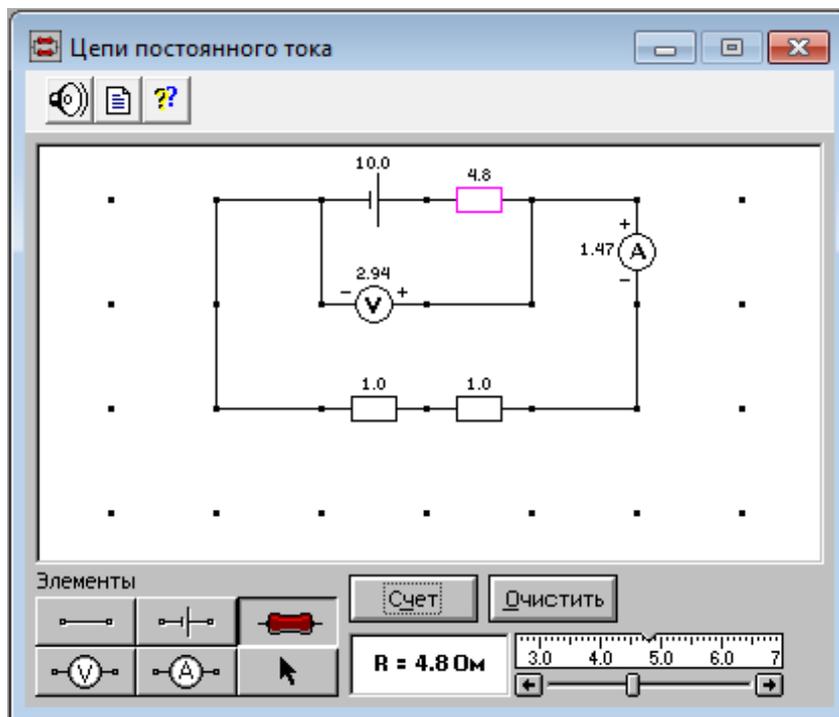


Рис.6.3

3. Для этого сначала щелкните левой кнопкой мыши над кнопкой ЭДС  в нижней части экрана. Переместите маркер мыши на рабочую часть экрана, где расположены точки. Щелкните левой кнопкой мыши в рабочей части экрана, где будет расположен источник ЭДС.

4. Разместите далее последовательно с источником резистор, изображающий его внутреннее сопротивление (нажав предварительно кнопку  в нижней части экрана) и амперметр (кнопка  там же). Затем расположите аналогичным образом резисторы нагрузки и вольтметр , измеряющий напряжение на нагрузке.

5. Подключите соединительные провода. Для этого нажмите кнопку провода  внизу экрана, после чего переместите маркер мыши в

рабочую зону схемы. Щелкайте левой кнопкой мыши в местах рабочей зоны экрана, где должны находиться соединительные провода.

6. Установите значения параметров для каждого элемента. Для этого щелкните левой кнопкой мыши на кнопке со стрелкой . Затем щелкните на данном элементе. Подведите маркер мыши к движку появившегося регулятора, нажмите на левую кнопку мыши и, удерживая ее в нажатом состоянии, меняйте величину параметра и установите числовое значение, обозначенное в таблице 6.2 для вашего варианта.

7. Установите сопротивление внешней цепи 2 Ом, нажмите кнопку «Счёт» и запишите показания электроизмерительных приборов в соответствующие строки таблицы 6.1.

8. Последовательно увеличивайте с помощью движка регулятора сопротивление внешней цепи на 0,5 Ом от 2 до 20 Ом и, нажимая кнопку «Счёт», записывайте показания электроизмерительных приборов в таблицу 6.1.

Указания по обработке результатов измерений

1. Вычислите по формулам (6.2), (6.7), (6.8), (6.9) мощности P_1 , P_2 , $P_{\text{полн}}$ и КПД η для каждой пары показаний вольтметра и амперметра и запишите рассчитанные значения в табл.6.1.

2. Постройте на одном листе миллиметровой бумаге формата А4 графики зависимостей от сопротивления внешней цепи мощностей $P_1 = f(R)$, $P_2 = f(R)$, $P_{\text{полн}} = f(R)$, КПД $\eta = f(R)$ и сопротивления на зажимах источника $U = f(R)$.

3. Рассчитайте погрешности измерений и сделайте выводы по результатам проведённых опытов.

Указания по оформлению отчета

Требования по оформлению отчета совпадают с требованиями, изложенными в работе № 2.

Контрольные вопросы

1. Запишите закон Джоуля-Ленца в интегральной и дифференциальной формах.
2. Что такое ток короткого замыкания?
3. Что такое полная мощность?
4. Как вычисляется КПД источника тока?
5. Докажите, что наибольшая полезная мощность выделяется при равенстве внешнего и внутреннего сопротивлений цепи.
6. Верно ли утверждение, что мощность, выделяемая во внутренней части цепи, постоянна для данного источника?

7. К зажимам батарейки карманного фонаря присоединили вольтметр, который показал 3,5 В. Затем вольтметр отсоединили и на его место подключили лампу, на цоколе которой было написано: $P = 30$ Вт, $U = 3,5$ В. Лампа не горела. Объясните явление.
8. При поочерёдном замыкании аккумулятора на сопротивления R_1 и R_2 в них за одно и то же время выделилось равное количество тепла. Определите внутреннее сопротивление аккумулятора.

Литература

1. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Академия, 2008. 560 с.
2. Бондарев Б.В., Калашников Н.П., Спирин Г.Г. Курс общей физики. Книга 2: Электромагнетизм. Оптика. Квантовая физика. М.: Академия, 2014 г. 441 с.

Лабораторная работа № 7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА К ЕГО МАССЕ МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

Цель работы

Целью лабораторной работы является измерение удельного заряда электрона методом магнетрона с использованием установки ФПЭ-03.

Описание метода измерений

Существуют различные методы определения отношения $|e|/m$, в основе которых лежат результаты исследования движения электрона в электрическом и магнитном полях. Один из них – метод магнетрона. Называется он так по тому, что конфигурация полей в нем напоминает конфигурацию полей в магнетронах – генераторах электромагнитных колебаний.

Сущность метода состоит в следующем: специальная двухэлектродная электронная лампа, электроды которой представляют собой коаксиальные цилиндры, помещается внутри соленоида так, что ось лампы совпадает с осью соленоида. Электроны, вылетающие из катода лампы, при отсутствии тока в соленоиде движутся радиально к аноду. При протекании тока по соленоиду в лампе создается магнитное поле, параллельное оси лампы, и на электроны начинает действовать сила Лоренца (7.1)

$$\vec{F} = e[\vec{v} \cdot \vec{B}], \quad (7.1)$$

где e – заряд электрона, \vec{v} – скорость электрона, \vec{B} – индукция магнитного поля.

Под действием этой силы, направленной в каждый момент времени перпендикулярно вектору скорости, траектория электронов искривляется. При определенном соотношении между скоростью электрона и индукцией магнитного поля электроны перестают падать на анод, и ток в лампе прекращается.

Рассмотрим подобное движение электронов в лампе при наличии магнитного поля. Для описания этого движения воспользуемся цилиндрической системой координат (рис. 7.1), в которой положение электрона определяется расстоянием его от оси лампы r , полярным углом φ и смещением вдоль оси Z .

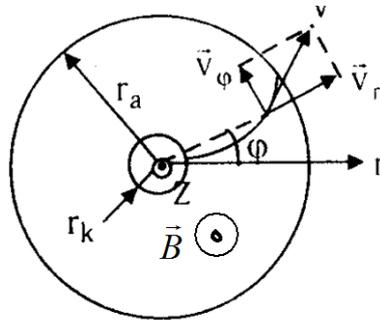


Рис. 7.1

Электрическое поле, имеющее только радиальную компоненту, действует на электрон с силой, направленной по радиусу от катода к аноду. Магнитная сила, действующая на электрон, не имеет составляющей, параллельной оси Z . Поэтому электрон, вылетевший из катода без начальной скорости (начальной скорости электронов, определяемые температурой катода, много меньше скоростей, приобретаемых ими при движении в электрическом поле лампы), движется в плоскости, перпендикулярной оси Z .

Момент импульса L_z электрона относительно оси Z может быть найден, как

$$L_z = m v_\varphi r, \quad (7.2)$$

где $v_\varphi = r \frac{d\varphi}{dt}$ – составляющая скорости, перпендикулярная радиусу r .

Момент M сил, действующих на электрон, относительно оси Z

определяется только той составляющей магнитной силы, которая перпендикулярна r . Электрическая сила и составляющая магнитной силы, направленные вдоль радиуса r , момента относительно оси Z не создают.

Таким образом:

$$M_z = rF_\varphi = r|e|v_r B, \quad (7.3)$$

где $v_r = \frac{dr}{dt}$ - радиальная составляющая скорости электрона.

Согласно основному закону динамики вращательного движения выполняется соотношение

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}, \quad (7.4)$$

проектируя которое на ось Z , получим

$$\frac{d(mv_\varphi r)}{dt} = |e|rv_\varphi B = |e|r \frac{dr}{dt} B \quad (7.5)$$

или

$$\frac{d(mv_\varphi r)}{dt} = \frac{1}{2}|e|B \frac{d(r^2)}{dt}.$$

Проинтегрировав уравнение (7.5), имеем:

$$mv_\varphi r = \frac{1}{2}|e|Br^2 + const.$$

Константу найдем из начальных условий: при $r = r_k$ (где r_k – радиус катода) $v_\varphi = 0$. Тогда:

$$const = -\frac{1}{2}|e|Br_k^2$$

и

$$v_\varphi = \frac{|e|B}{2mr} (r^2 - r_k^2). \quad (7.6)$$

Кинетическая энергия электрона равна работе сил электрического поля:

$$\frac{m(v_\varphi^2 - v_r^2)}{2} = |e|U, \quad (7.7)$$

где U – потенциал относительно катода точки поля, в которой находится электрон.

Подставляя в (7.7) значение v_φ из (7.6), получаем

$$|e|U = \frac{m}{2} \left[v_r^2 + \frac{e^2 B^2}{4m^2 r^2} (r^2 - r_k^2)^2 \right]. \quad (7.8)$$

При некотором значении индукции магнитного поля $B_{кр}$, которое называют критическим, скорость электрона вблизи анода станет перпендикулярной радиусу r , т.е. при $r=r_a$, $v_r=0$. Тогда уравнение (7.8) примет вид

$$|e|U_a = \frac{e^2 B_{кр}^2}{8mr_a^2} (r_a^2 - r_k^2)^2, \quad (7.9)$$

где U_a – потенциал анода относительно катода (анодное напряжение); r_a – радиус анода.

Отсюда находим выражение для удельного заряда электрона

$$\frac{|e|}{m} = \frac{8U_a}{B_{кр}^2 r_a^2 (1 - r_k^2 / r_a^2)^2}. \quad (7.10)$$

При этом индукция магнитного поля соленоида, длина L которого много больше его диаметра, находится по формуле

$$B_{кр} = \frac{\mu_0 N I_{кр}}{L}, \quad (7.11)$$

где N – число витков соленоида, $I_{кр}$ – ток в соленоиде, L – длина соленоида.

Таким образом, экспериментально определив $B_{кр}$, можно вычислить величину e/m . Для нахождения $B_{кр}$ в лампе следует установить разность потенциалов между анодом и катодом и, включив ток в соленоиде, постепенно наращивать его, что увеличивает магнитное поле в лампе.

Если бы все электроны покидали катод со скоростью, равной нулю, то зависимость величины анодного тока от величины индукции магнитного поля имела бы вид, показанный на рис. 7.2а (пунктирная линия), что соответствует аналогичной зависимости анодного тока от тока в соленоиде (рис.7.2б). В этом случае при $B < B_{кр}$ все электроны, испускаемые катодом, достигали бы анода, а при $B > B_{кр}$ ни один электрон не попадал бы на анод.

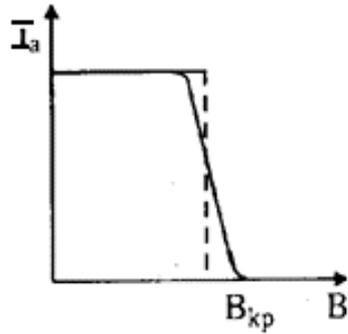


Рис. 7.2а

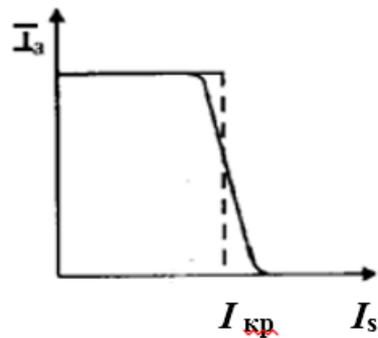


Рис.7.2б

Однако некоторая некоаксиальность катода и анода, наличие остаточного газа в лампе, падение напряжения вдоль катода и т.д. приводят к тому, что критические условия достигаются для разных электронов при различных значениях V . Все же перелом кривой останется достаточно резким и может быть использован для определения $V_{кр}$.

Описание установки

Экспериментальная установка состоит из модуля ФПЭ-03, источника питания ФПЭ-ИП и мультиметра МТ.

Структурная схема установки приведена на рис. 7.3.

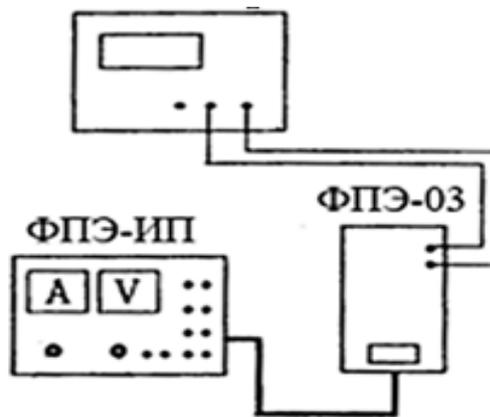


Рис. 7.3

Предварительное задание

Каждый студент должен ознакомиться с теорией изучаемого явления, с методом измерений и с описанием экспериментальной установки, а также подготовить таблицу 7.1 для записи экспериментальных результатов.

Таблица 7.1

$U_a=30\text{ В}$		$U_a=40\text{ В}$		$U_a=50\text{ В}$	
$I_s\text{ (А)}$	$I_a\text{ (мА)}$	$I_s\text{ (А)}$	$I_a\text{ (мА)}$	$I_s\text{ (А)}$	$I_a\text{ (мА)}$

Указания по выполнению эксперимента

1. Рассчитать цену деления вольтметра источника питания - ФПЭ- ИП, вся шкала которого (75 делений) соответствует 150 В. Включить установку нажатием клавиши «Питание установки». Регулятором анодного напряжения установить анодное напряжение $U_a = 30\text{ В}$, не меняя его в течение всей серии измерений.
2. Рассчитать цену деления миллиамперметра, измеряющего анодный ток. Учесть, что 75 делений шкалы соответствуют предельному значению тока, измеряемому миллиамперметром, равному 7,5 мА.
3. Рассчитать цену деления амперметра, измеряющего ток, текущий по соленоиду. Учесть, что 75 делений шкалы соответствуют предельному значению тока, измеряемому амперметром, равному 1,5 А. Перед включением тока через соленоид установить движок реостата в крайнее правое положение, соответствующее минимальному току.
4. Включить ток через соленоид. Найти минимальный ток, протекающий по соленоиду, и соответствующий ему анодный ток. Данные занести в таблицу.
5. Увеличить ток соленоида до ближайшего большего деления, соответствующего десятым долям ампера. Увеличение тока, текущего через соленоид, осуществляется перемещением движка реостата влево. Снять показания с обоих амперметров и также занести в таблицу.
6. Изменяя ток в соленоиде до предельного тока 1,5 А через 0,1А снять сбросовую характеристику, т.е. зависимость анодного тока I_a от тока в соленоиде I_s при постоянном анодном напряжении. Значения анодного тока I_a , определяемые по показаниям миллиамперметра, и значения тока в соленоиде I_s , определяемые по показаниям амперметра – источника питания ФПЭ-ИП, занести в табл. 7.1.
7. Сразу же после окончания измерений вернуть движок реостата в крайнее правое положение.
8. Повторить п.п. 2 и 3 при двух других значениях анодного напряжения $U_a = 40\text{ В}$ и $U_a = 50\text{ В}$. Результаты измерений также занести в табл. 7.1.

Указания по технике безопасности

Не допускать увеличение тока, текущего через соленоид, выше предельного значения 1,5 А, т.е. стрелка прибора ни в коем случае не должна зашкаливать. Время измерения крайних точек должно быть минимальным, чтобы не допускать перегрева прибора.

Указания по обработке результатов измерений

1. Для каждого значения анодного напряжения на одном листе миллиметровой бумаги построить сбросовую характеристику, откладывая по оси абсцисс значения тока в соленоиде I_s , а по оси ординат – значения анодного тока I_a . Примерный вид сбросовой характеристики показан на рис. 7.2б. Для нахождения критического значения тока в соленоиде $I_{кр}$ найти участок, соответствующий максимальному спаду кривой. Из середины этого участка опустить перпендикуляр на ось I_s , как это показано на рис. 7.2б. Занести полученные значения критического тока в соленоиде $I_{кр}$ в таблицу 7.2.

Таблица 7.2

U_a В	$I_{кр}$ А	$B_{кр}$ Тл	$ e /t$ Кл/кг

2. Для каждого критического значения тока в соленоиде $I_{кр}$ по формуле (7.11) рассчитать индукцию магнитного поля $B_{кр}$. Технические характеристики модуля ФПЭ-03: радиус анода лампы $r_a=6,0$ мм, радиус катода лампы $r_k=0,3$ мм, число витков соленоида $N=2129$, длина соленоида $L=0,2$ м.

3. Вычислить $|e|/t$ по формуле (7.10) для каждого значения $B_{кр}$ и определить среднее значение $\overline{|e|/t}$.

4. Сравнить полученное значение с табличным значением $\frac{|e|}{t} = 1.76 \cdot 10^{11}$ Кл/к

Указания по оформлению отчета

Требования по оформлению отчета совпадают с требованиями, изложенными в работе № 2.

Контрольные вопросы

1. В чем суть метода магнетрона для определения отношения $|e|/h$?
2. Будет ли влиять на величину $B_{кр}$ изменение направления тока соленоида на противоположное? Зависит ли величина $|e|/h$ от величины анодного напряжения?

Литература

1. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Академия, 2008. 560 с.
2. Бондарев Б.В., Калашников Н.П., Спириин Г.Г. Курс общей физики. Книга 2: Электромагнетизм. Оптика. Квантовая физика. М.: Академия, 2014 г. 441 с.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Ознакомление с электроизмерительными приборами.....	3
2. Градуировка гальванометра.....	12
3. Измерение сопротивления резисторов мостовым методом...	16
4. Экспериментальная проверка обобщенного закона Ома (схема с одним источником ЭДС).....	20
5. Определение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля земли и переводного множителя тангенс – гальванометра.....	26
6. Исследование зависимости мощности и КПД источника постоянного тока от внешней нагрузки (компьютерный вариант).....	30
7. Определение отношения заряда электрона к его массе методом магнетрона.....	36