

**В. И. БАРСУКОВ, О. С. ДМИТРИЕВ,
В. Е. ИВАНОВ, Ю. П. ЛЯШЕНКО**

ФИЗИКА

**ПОСТОЯННЫЙ ТОК,
ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ,
ВОЛНОВАЯ ОПТИКА**

**Тамбов
Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
2014**

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Тамбовский государственный технический университет»

В. И. Барсуков, О. С. Дмитриев, В. Е. Иванов, Ю. П. Ляшенко

ФИЗИКА

ПОСТОЯННЫЙ ТОК, ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ, ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

*Допущено Научно-методическим Советом по физике
Министерства образования и науки Российской Федерации
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по техническим направлениям подготовки
и специальностям*



Тамбов
Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
2014

УДК 535.621.3.024+537.8 (076.5)
ББК В343я73-5
Ф50

Р е ц е н з е н т ы :

Доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель
науки Российской Федерации, заведующий кафедрой общей физики
ФГБОУ ВПО «ТГУ им. Г. Р. Державина»
В. А. Федоров

Доктор технических наук, профессор,
директор Тамбовского филиала ФГБОУ ВПО «МГУКИ»
В. М. Тютюнник

Ф50 **Физика.** Постоянный ток, электромагнетизм, волновая оптика :
практикум для студентов, обучающихся по техническим направле-
ниям подготовки и специальностям / В. И. Барсуков, О. С. Дмитриев,
В. Е. Иванов, Ю. П. Ляшенко. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО
«ТГТУ», 2014. – 104 с. – 300 экз. – ISBN 978-5-8265-1251-7.

Представлены методические указания по выполнению 17 лабора-
торных работ по разделам «Постоянный ток, электромагнетизм, волновая оп-
тика» курса общей физики. Даны описания лабораторных установок, теоре-
тическое обоснование соответствующих методов экспериментального ре-
шения поставленных задач, а также методика обработки полученных ре-
зультатов измерений. Приведены контрольные вопросы и список рекомен-
дуемой литературы.

Предназначен для выполнения лабораторных работ студентами 1–2 кур-
сов высших учебных заведений, обучающимися по техническим направле-
ниям подготовки и специальностям.

УДК 535.621.3.024+537.8 (076.5)
ББК В343я73-5

ISBN 978-5-8265-1251-7

© Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Тамбовский государственный технический
университет» (ФГБОУ ВПО «ТГТУ»), 2014

ВВЕДЕНИЕ

Представленные в практикуме лабораторные работы преследуют следующие две цели: 1) дать при сравнительно небольшом объёме иллюстрацию важнейших разделов (постоянный ток, электромагнетизм и волновая оптика) программы общего курса физики, соответствующего Государственному стандарту ГОУ ВПО и 2) предоставить практические работы, которые можно легко поставить в лабораториях физического практикума.

Все работы содержат краткое методическое описание изучаемой темы и используемых приборов и принадлежностей.

Обработка результатов измерений, в основном, базируется на использовании ГОСТ 8.207–76, ГОСТ Р 8.736–2011 ГСИ, МИ 2083–90 ГСИ и международной системе единиц – СИ.

Работа по составлению сборника была распределена между авторами следующим образом: В. И. Барсуков подготовил работы № 1, 2, 6 – 8, 11, 12; О. С. Дмитриев – работы № 5, 9, 10; В. Е. Иванов переработал к условиям лаборатории кафедры физики ФГБОУ ВПО «ТГТУ» работы № 15 – 17, основанные на применении коммерческих установок и программ к ним; Ю. П. Ляшенко подготовил работы № 3, 4, 13, 14.

При подготовке практикума к изданию были учтены замечания и рекомендации рецензентов: доктора физико-математических наук, профессора, заслуженного деятеля науки Российской Федерации, заведующего кафедрой общей физики ФГБОУ ВПО «ТГУ им. Г. Р. Державина» В. А. Федорова и доктора технических наук, профессора, директора Тамбовского филиала ФГБОУ ВПО «МГУ Ки» В. М. Тютюнника.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МОСТИКА «УИТСТОНА»

Цель работы: ознакомление с принципом работы измерительной мостовой схемы и экспериментальное определение величины неизвестного сопротивления.

Приборы и принадлежности: источник постоянной ЭДС; магазин сопротивлений; неизвестные сопротивления (три пары – $R_{1,x}$, $R_{2,x}$); реохорд; гальванометр; ключ; мост постоянного тока типа ММВ; авометр (тестер) любого типа.

Методические указания и описание установки

Одним из наиболее точных способов измерения сопротивлений является метод мостика Уитстона. Принципиальная схема представляет собой замкнутый прямоугольник, образованный сопротивлениями R_1 , R_2 , R_3 , R_4 (рис. 1). В диагональ AC подсоединяется источник постоянного тока ε , а в диагональ BD , образующую «мост», нуль-гальванометр G . Сопротивления R_1 , R_2 , R_3 , R_4 называются *плечами моста*. При произвольно выбранных сопротивлениях R_1 , R_2 , R_3 , R_4 в диагонали BD будет идти ток, вызывающий отклонение стрелки гальванометра в ту или другую сторону. Величина этого тока определяется по закону Ома:

$$I_g = \frac{\varphi_B - \varphi_D}{r_g},$$

где φ_B и φ_D – потенциалы в точках B и D ; r_g – сопротивление гальванометра.

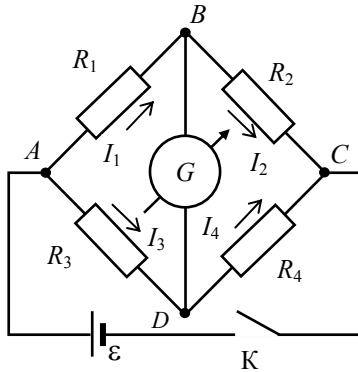


Рис. 1. Схема мостика Уитстона

Подбирая определённые соотношения сопротивлений R_1, R_2, R_3, R_4 , можно добиться отсутствия тока в цепи гальванометра ($I_g = 0$).

Это означает, что потенциалы точек B и D одинаковы, т.е. $\varphi_B = \varphi_D$. В этом случае мост называют *сбалансированным*.

Токи, текущие через сопротивления R_1, R_2, R_3, R_4 , обозначим соответственно I_1, I_2, I_3, I_4 . Для нахождения соотношения между этими сопротивлениями запишем закон Ома для каждого из участков цепи (с учётом направления токов) через разности потенциалов на концах соответствующих сопротивлений:

$$I_1 R_1 = \varphi_A - \varphi_B; \quad (1)$$

$$I_3 R_3 = \varphi_A - \varphi_D; \quad (2)$$

$$I_2 R_2 = \varphi_B - \varphi_C; \quad (3)$$

$$I_4 R_4 = \varphi_D - \varphi_C. \quad (4)$$

При условии $I_g = 0$, когда $\varphi_B = \varphi_D$, в уравнениях (1), (2) и (3), (4) правые части равны, следовательно, равны и левые части:

$$I_1 R_1 = I_3 R_3, \quad (5)$$

$$I_2 R_2 = I_4 R_4. \quad (6)$$

Уравнения (5) и (6) называются уравнениями сбалансированного моста. Для последовательно соединённых сопротивлений R_1 и R_2 , R_3 и R_4 и отсутствия тока в диагонали BD имеем $I_1 = I_2$ и $I_3 = I_4$. Разделив почленно уравнение (5) на (6), получаем:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4},$$

откуда, например,

$$R_1 = R_2 \frac{R_3}{R_4}. \quad (7)$$

В настоящей работе используется установка, электрическая схема которой показана на рис. 2. Сопротивление R_1 заменено неизвестным сопротивлением R_x , величину которого нужно определить; вместо постоянного резистора R_2 включён магазин сопротивлений R_m , позволяющий менять значение этого сопротивления в широком диапазоне; сопротивления R_3 и R_4 заменены единой эталонированной проволокой ADC (её сечение одинаково по всей длине) – *реохордом*.

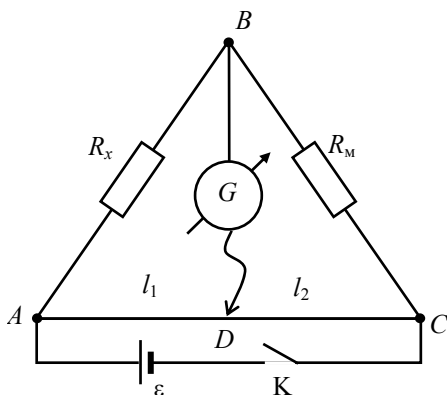


Рис. 2. Схема рабочей установки

Движок D , перемещаясь по реохорду, меняет плечи мостика R_3 и R_4 . Так, сопротивление однородного цилиндрического проводника

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где ρ – удельное сопротивление; l – длина и S – сечение проволоки реохорда. При постоянных ρ и S сопротивление R пропорционально длине l и отношение сопротивлений R_3 / R_4 в уравнении (7) будет эквивалентно отношению плеч реохорда, т.е.

$$\frac{R_3}{R_4} = \frac{l_1}{l_2}. \quad (8)$$

В итоге, уравнение (7) для расчёта неизвестного сопротивления (R_x) принимает окончательный вид

$$R_x = R_M \frac{l_1}{l_2}. \quad (9)$$

Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

Задание 1. Определение сопротивления с помощью модели мостика Уитстона.

1. В плечо AB (рис. 2) включите одно из двух заданных преподавателем неизвестных сопротивлений $R_{1,x}$, $R_{2,x}$, например $R_{1,x}$. Движок реохорда поставьте так, чтобы он находился в средней трети длины реохорда. Замкните ключ K , нажав кнопку, и вращением ручек соответствующих декад магазина сопротивлений R_M (исключая X10000) выберите интервал сопротивлений, при котором стрелка гальванометра не зашкаливает ни вправо, ни влево и легко выводится на нуль. Для первоначального положения движка реохорда подбором соответствующего сопротивления декад магазина R_M установите стрелку на нуль, а полученные значения l_1 и l_2 и соответствующее сопротивление магазина запишите в табл. 1.

2. Измените сопротивление магазина R_M , увеличив или уменьшив его примерно на 10% от первоначального значения. Передвигая движок

реохорда при нажатой кнопке ключа, вновь добейтесь нулевого тока в цепи гальванометра и занесите новые значения l_1 , l_2 и R_M в табл. 1. Проведите 5 таких измерений, изменяя каждый раз сопротивление магазина R_M на 10% от предыдущего значения.

3. В этой же последовательности произведите измерения второго неизвестного сопротивления $R_{2,x}$, а затем величины общих сопротивлений $R_{x\text{ посл}}$ и $R_{x\text{ пар}}$ при последовательном и параллельном соединении сопротивлений $R_{1,x}$ и $R_{2,x}$. Данные занесите в табл. 2 – 4.

Таблица 1

$R_{1,x}$	№ п/п	R_M , Ом	l_1 , мм	l_2 , мм	$R_{1,xi}$, Ом	$\Delta R_{1,xi}$, Ом	$R_{1,x} = \bar{R}_{1,x} \pm \Delta \bar{R}_{1,x}$, Ом
$R_{1,x}$	1						
	2						
	3						
	4						
	5						
			$\bar{R}_{1,x} =$			$\Delta \bar{R}_{1,x} =$	
Результаты из задания 2							
Результаты из задания 3							

Таблица 2

$R_{2,x}$	№ п/п	R_M , Ом	l_1 , мм	l_2 , мм	$R_{1,xi}$, Ом	$\Delta R_{2,xi}$, Ом	$R_{2,x} = \bar{R}_{2,x} \pm \Delta \bar{R}_{2,x}$, Ом
$R_{2,x}$	1						
	2						
	3						
	4						
	5						
			$\bar{R}_{2,x} =$			$\Delta \bar{R}_{2,x} =$	
Результаты из задания 2							
Результаты из задания 3							

Таблица 3

$R_{x, \text{ посл}}$	№ п/п	$R_M,$ Ом	$l_1,$ мм	$l_2,$ мм	$R_{xi, \text{ посл}},$ Ом	$\Delta R_{xi, \text{ посл}},$ Ом	$R_{x, \text{ посл}} = \bar{R}_{x, \text{ посл}} \pm$ $\pm \Delta \bar{R}_{x, \text{ посл}}, \text{ Ом}$
$R_{x, \text{ посл}}$	1						
	2						
	3						
	4						
	5						
			$\bar{R}_{x, \text{ посл}} =$			$\Delta \bar{R}_{x, \text{ посл}} =$	
Результаты из задания 2							
Результаты из задания 3							

Таблица 4

$R_{x, \text{ пар}}$	№ п/п	$R_M,$ Ом	$l_1,$ мм	$l_2,$ мм	$R_{xi, \text{ пар}},$ Ом	$\Delta R_{xi, \text{ пар}},$ Ом	$R_{x, \text{ пар}} = \bar{R}_{x, \text{ пар}} \pm$ $\pm \Delta \bar{R}_{x, \text{ пар}}, \text{ Ом}$
$R_{x, \text{ пар}}$	1						
	2						
	3						
	4						
	5						
			$\bar{R}_{x, \text{ пар}} =$			$\Delta \bar{R}_{x, \text{ пар}} =$	
Результаты из задания 2							
Результаты из задания 3							

4. По формуле (9), используя результаты измерений, рассчитайте по пять значений сопротивлений $R_{1,x}$ и $R_{2,x}$ и найдите их средние значения $\bar{R}_{1,x}$ и $\bar{R}_{2,x}$.

5. По формуле (9) аналогично рассчитайте по 5 значений общих сопротивлений при последовательном и параллельном соединении сопротивлений. Найдите их средние значения $\bar{R}_{x, \text{ посл}}$ и $\bar{R}_{x, \text{ пар}}$.

6. Вычислите абсолютные погрешности $\Delta R_{1, xi}$ и $\Delta R_{2, xi}$ для каждого искомого сопротивления, а также абсолютные ошибки общих сопротивлений при последовательном и параллельном включении сопротивлений

$\Delta R_{x_i, \text{ посл}}$ и $\Delta R_{x_i, \text{ пар}}$. Рассчитайте среднюю абсолютную погрешность для каждого неизвестного сопротивления $\Delta \bar{R}_{1, x}$, $\Delta \bar{R}_{2, x}$ и среднюю абсолютную погрешность общих сопротивлений при последовательном и параллельном соединении сопротивлений $\Delta \bar{R}_{x, \text{ посл}}$ и $\Delta \bar{R}_{x, \text{ пар}}$.

7. По найденным средним величинам сопротивлений и средним значениям их абсолютных ошибок рассчитайте для каждого случая относительные погрешности E .

8. Сравните экспериментально полученные значения общих сопротивлений $\bar{R}_{x, \text{ посл}}$ и $\bar{R}_{x, \text{ пар}}$ в табл. 3 и 4 с теоретическими, рассчитываемыми при последовательном и параллельном соединении резисторов.

Задание 2. Определение сопротивления с помощью коммерческого моста постоянного тока типа ММВ.

1. Познакомьтесь с внешним видом и устройством моста ММВ (взять у лаборанта).

2. Подключите неизвестное (из определяемых в задании 1) сопротивление с помощью «крокодилов» или штекеров к клеммам моста.

3. Нажмите на кнопку К включения питания моста и визуально по плавности отклонения стрелки гальванометра в стороны «мало», «много» с помощью переключателя установите диапазон измерений: $\times 1$, $\times 10$, $\times 100$, $\times 1000$, $\times 10\,000$.

4. С помощью ручки реохорда, вращением её по или против часовой стрелки в диапазоне $0,5 \dots 50$ установите стрелку гальванометра на нуль.

5. Величина сопротивления R_x определится диапазоном измерений и соответствующим делением реохорда, установившимся против индикаторной стрелки – на приборе это изображено в виде

$$R_x = \sqrt{\times} \Omega \rightarrow$$

Результаты измерений занесите в табл. 1 – 4.

Задание 3. Определение сопротивления с помощью ампервольтметра – авометра (тестера).

1. Познакомьтесь с внешним видом и устройством авометра (взять у лаборанта). Установите стрелку на нуль.

2. Подключите неизвестное сопротивление (из определённых в задании 1) с помощью «крокодилов» или штекеров к клеммам прибора.

3. Переключатель рода работы авометра поставьте в положение R_x .

4. Переключатель диапазона измерений поставьте в такое положение, чтобы ошибка измерений была наименьшей (отклонение стрелки наибольшее).

5. Результаты измерения отдельных сопротивлений, их последовательного и параллельного соединений запишите в табл. 1 – 4 и сравните с ранее полученными в заданиях 1 и 2.

Контрольные вопросы

1. Нарисуйте схему мостика Уитстона и объясните принцип его действия.
2. Выведите расчётную формулу (9).
3. Напишите и объясните законы Ома для однородного, неоднородного участков и полной цепи.
4. Зависит ли погрешность измерений от положения движка реохорда?
5. Получите расчётную формулу (9) с использованием правила Кирхгофа.
6. Используя классическую теорию электропроводности металлов, получите выражение для удельной электропроводности металлов.
7. Как зависит электрическое сопротивление проводника от его температуры?
8. Получите закон Джоуля–Ленца в интегральной и дифференциальной формах.
9. Что такое электрический ток, сила тока, плотность тока?

Лабораторная работа 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭДС И ВНУТРЕННЕГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ИСТОЧНИКА ТОКА МЕТОДОМ КОМПЕНСАЦИИ

Цель работы: ознакомление с методом компенсации и применение его для измерения электродвижущей силы и внутреннего сопротивления источника тока

Приборы и принадлежности: источник питания 12В; эталонный и неизвестный источники ЭДС; нуль-прибор; реохорд; балластное и переменное сопротивления; два сопротивления известного номинала; ключи.

Методические указания и описание установки

ЭДС источника – это энергия, которую приобретает единичный заряд, проходя через источник тока, измеряемая отношением работы, совершаемой при перемещении заряда сторонними силами по замкнутой цепи, к величине этого заряда:

$$\varepsilon = \frac{A}{q} = \oint E_{\text{ст}} dl, \quad (1)$$

где $E_{\text{ст}}$ – напряжённость поля сторонних сил, перемещающих заряд q по цепи; dl – элементарный участок замкнутого контура.

Сторонние силы (всегда неэлектрического происхождения) осуществляют разделение разноименных зарядов в источнике и поддерживают разность потенциалов на концах проводника, подключённого к источнику тока.

В электрической цепи, содержащей помимо источника ЭДС с внутренним сопротивлением r ещё и внешнее сопротивление R , величина ε равна сумме падений напряжений U_R и U_r на сопротивлениях R и r т.е. $\varepsilon = U_R + U_r$ или $\varepsilon = IR + Ir$, откуда

$$I = \frac{\varepsilon}{R+r}. \quad (2)$$

Это закон Ома для *полной цепи*. Заменяв ток I на U/R для внешней цепи, уравнение (2) преобразуем к виду

$$U = \left(\frac{\varepsilon}{R+r} \right) R = \frac{\varepsilon}{(1+r/R)}. \quad (3)$$

Видно, что U всегда меньше ε , и поэтому ЭДС не может быть измерена точно с помощью вольтметра, имеющего достаточно большое, но конечное значение сопротивления R_V .

В то же время из закона Ома для полной цепи $\varepsilon = U + Ir$ следует, что $\varepsilon = U$ при отсутствии тока во внешней цепи ($I = 0$). Это используется для определения величины ЭДС источника в так называемом методе компенсации, рассматриваемом в настоящей лабораторной работе. В основу метода компенсации положен метод *сравнения электродвижущих сил двух элементов*, ЭДС одного из которых известна. На рисунке 1 представлена принципиальная схема метода. Источники ε_1 и ε_x с внутренними сопротивлениями соответственно r_1 и r_2 соединены одноименными полюсами. При этом ε_1 должна быть больше ε_x ($\varepsilon_1 > \varepsilon_x$). R_1 и R_2 – сопротивления участков AB и BC , G – гальванометр. Стрелками указано направление токов.

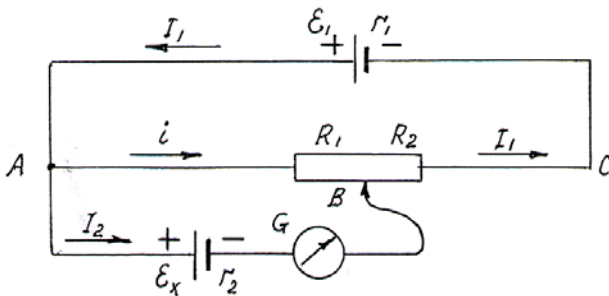


Рис. 1. Принципиальная схема метода

Запишем уравнения по правилам Кирхгофа. По первому – для узла A :

$$I_1 - I_2 - i = 0. \quad (4)$$

По второму правилу для контуров $AC \varepsilon_1 A$ и $A \varepsilon_x BA$:

$$I_1(R_2 + r_1) + iR_1 = \varepsilon_1, \quad iR_1 - I_2 r_2 = \varepsilon_x \quad (5)$$

(внутренним сопротивлением гальванометра G пренебрегаем).

Изменяя соотношение сопротивлений R_1 и R_2 (перемещением контакта B), можно добиться того, чтобы ток (I_2) через гальванометр, а значит, и элемент ε_x не протекал. При $I_2 = 0$ ток $I_1 = i$ и уравнения (5) примут вид:

$$I_1(R_2 + r_1 + R_1) = \varepsilon_1; \quad I_1 R_1 = \varepsilon_x. \quad (6)$$

Следовательно, сила тока в цепи элемента ε_x равна нулю в том случае, когда ЭДС неизвестного элемента компенсируется падением напряжения на участке AB . Поэтому и метод называется «компенсационным».

Из (6) получаем

$$\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_1} = \frac{R_1}{(R_1 + R_2 + r_1)}. \quad (7)$$

В уравнении остаётся неизвестным сопротивление r_1 . Чтобы его исключить проводят сравнение с эталонным источником тока, включаемым вместо источника ε_x . Таким источником является нормальный (ртутно-кадмиевый) элемент, ЭДС которого ε_N . ЭДС ε_N теперь будет компенсироваться при других соотношениях сопротивлений R_1 и R_2 . Обозначим их через R'_1 и R'_2 . Тогда уравнение (7) переписывается как

$$\frac{\varepsilon_N}{\varepsilon_1} = \frac{R'_1}{(R'_1 + R'_2 + r_1)}, \quad (8)$$

так как $R_1 + R_2 = R'_1 + R'_2$, то из уравнений (7) и (8) следует, что

$$\frac{\varepsilon_N}{\varepsilon_x} = \frac{R'_1}{R_1} \quad \text{или} \quad \varepsilon_x = \varepsilon_N \frac{R_1}{R'_1}. \quad (9)$$

Как правило, в качестве сопротивлений $(R_1 + R_2) = (R'_1 + R'_2)$ используется эталонированная проволока (*реохорд*). Сопротивление такого проводника определяется его параметрами, т.е. $R_1 = \rho (l_1 / S)$, а $R'_1 = \rho (l'_1 / S)$, следовательно, отношение $R_1 / R'_1 = l_1 / l'_1$. Так как $l_1 = kn_1$, а $l'_1 = kn'_1$, где

k – цена деления реохорда, а n_1 и n'_1 – отсчёты по шкале реохорда, соответствующие включению в цепь ε_x и ε_N , то $l_1/l'_1 = n_1/n'_1$ или $l_1/l'_1 = n_x/n_N$. Тогда расчётная формула (9) окончательно (в делениях или мм) запишется в виде

$$\varepsilon_x = \varepsilon_N \frac{n_1}{n'_1} = \varepsilon_N \frac{n_x}{n_N}. \quad (10)$$

Работа выполняется на установке, электрическая схема которой дана на рис. 2. Здесь ε_1 – источник питания постоянного тока; G – гальванометр; ABC – реохорд; K_1 и K_2 – ключи; K – перекидной ключ, позволяющий поочерёдно включать элементы ε_N и ε_x ; R – балластное сопротивление, включаемое для уменьшения тока в цепи нормального элемента и гальванометра в начальные моменты опыта, так как через нормальный элемент можно пропускать ток, не превышающий 10^{-5} А (это ограничение существенно и для гальванометра); R_0 – переменное сопротивление, с помощью которого можно изменять условия опыта.

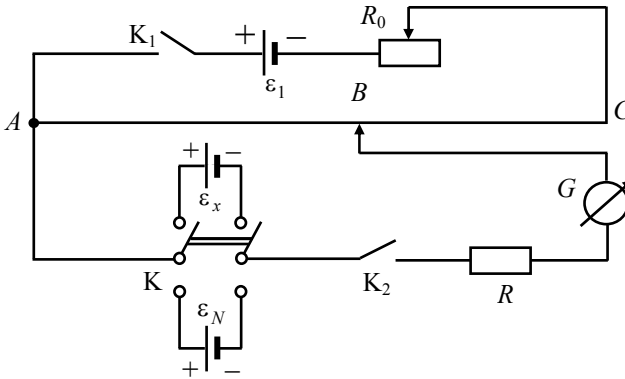


Рис. 2. Схема рабочей установки

Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

Задание 1. Определение ЭДС неизвестного источника тока.

1. Ознакомьтесь с устройством установки и проверьте правильность сборки элементов согласно схеме на рис. 2, обратите внимание на полярность источников ε_x и ε_N .

2. Соблюдая полярность, включите вилку элемента ε_1 в розетку «+12В», установленную на лабораторном столе.

3. Ключом K включите в цепь элемент ε_x , ключи K_1 и K_2 замкните.

4. Переместите ползунок B реохорда в правую его половину. С помощью реостата R_0 добейтесь того, чтобы стрелка гальванометра G установилась на нуль. Возьмите отсчёт n_x по шкале реохорда между точками A и C и запишите его в табл. 1.

Таблица 1

№ п/п	n_x , дел.	n_N , дел.	Δn_x , дел.	Δn_N , дел.	$(\Delta n_x)^2$, дел. ²	$(\Delta n_N)^2$, дел. ²	$\overline{\Delta n_x}$, дел.	$\overline{\Delta n_N}$, дел.
1								
2								
3								
4								
5								
Ср.					$S_{\text{кв}} =$	$S_{\text{кв}} =$		

5. Ключом K переключите цепь на эталонный элемент ε_N , и перемещая ползунок B реохорда, добейтесь нулевого показания гальванометра.

Возьмите отсчёт n_N по шкале реохорда между точками A и C и запишите его в табл. 1.

6. Не изменяя сопротивление R_0 ещё четыре раза, переключите ключ K вправо и влево и, добиваясь нулевого положения стрелки гальванометра, определите новые значения n_x и n_N и внесите их в табл. 1.

7. По полученным значениям n_x и n_N рассчитайте их средние величины и найдите $\varepsilon_{x\text{ср}}$.

8. По методу Стьюдента рассчитайте относительную E_1 и абсолютную погрешность $\Delta\varepsilon_x$.

9. Конечную величину искомой ЭДС ε_x дайте в виде

$$\varepsilon_x = \varepsilon_{x\text{ср}} \pm \Delta\varepsilon_x.$$

10. Проанализируйте полученный результат и сделайте выводы.

Задание 2. Определение внутреннего сопротивления источника тока.

Если к клеммам двойного переключателя K , к которым подключена неизвестная ЭДС ε_x , с помощью штекеров подключить поочерёдно известные сопротивления R_1 и R_2 , то получим замкнутую цепь (рис. 3), для которой по закону Ома можно записать уравнения:

$$\varepsilon_x = I_1 R_1 + I_1 r = U_1 + I_1 r, \quad (1)$$

$$\varepsilon_x = I_2 R_2 + I_2 r = U_2 + I_2 r, \quad (2)$$

где U_1 и U_2 – падение напряжения на сопротивлениях R_1 и R_2 .

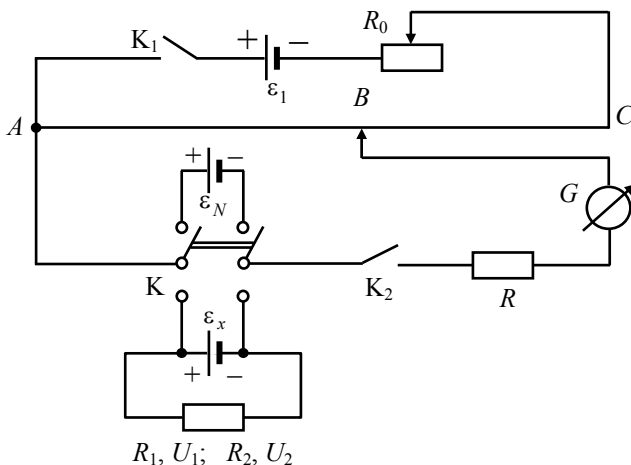


Рис. 3. Схема установки для определения внутреннего сопротивления r

Здесь токи I_1 и I_2 , протекающие через сопротивления R_1 и R_2 , определяются как

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1} \quad (3)$$

и

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2}, \quad (4)$$

А падение напряжения U_1 и U_2 на сопротивлениях R_1 и R_2 определяются так же, как неизвестная ЭДС ε_x в первой части работы, т.е.

$$U_1 = \varepsilon_N \frac{n_1}{n_{N_1}} \quad (5)$$

и

$$U_2 = \varepsilon_N \frac{n_2}{n_{N_2}}. \quad (6)$$

Приравняв правые части уравнений (1) и (2) и заменив токи по (3) и (4), получаем

$$U_1 + \frac{U_1}{R_1}r = U_2 + \frac{U_2}{R_2}r,$$

откуда имеем, что внутреннее сопротивление r равно

$$r = \frac{U_1 - U_2}{R_1 U_2 - R_2 U_1} R_1 R_2. \quad (7)$$

1. Составьте таблицы для определения падения напряжения U_1 и U_2 .

Таблица 2

№ п/п	n_1 , дел.	n_{N1} , дел.	Δn_1 , дел.	Δn_{N1} , дел.	Δn_1^2	Δn_{N1}^2	$\Delta \bar{n}_1$, дел.	$\Delta \bar{n}_{N1}$, дел.
1								
2								
3								
4								
5								
Ср					$S_{\text{квадр}} =$			

Таблица 3

№ п/п	n_2 , дел.	n_{N2} , дел.	Δn_2 , дел.	Δn_{N2} , дел.	Δn_2^2	Δn_{N2}^2	$\Delta \bar{n}_2$, дел.	$\Delta \bar{n}_{N2}$, дел.
1								
2								
3								
4								
5								
Ср					$S_{\text{квадр}} =$			

2. Произведите измерения n_1 и n_2 , n_{N1} и n_{N2} аналогично измерениям при определении ϵ_x .

3. По формулам (5) и (6) вычислите U_1 и U_2 и по полученным результатам и формуле (7) определите внутреннее сопротивление r .

Контрольные вопросы

1. Что такое сторонние силы, каковы их природа и роль в электрической цепи?
2. Что понимают под ЭДС источника тока, разностью потенциалов и напряжением на участке цепи?
3. Напишите закон Ома для полной цепи и поясните смысл выражения «сумма падений напряжений».
4. Объясните, почему напряжение на клеммах источника всегда меньше значения его ЭДС?
5. Почему вольтметром нельзя точно измерить величину ЭДС источника?
6. При каких условиях величина напряжения может быть равна ЭДС?
7. В чём состоит сущность метода компенсации, используемого для определения ЭДС источника?
8. Почему ЭДС известного источника должна быть больше ЭДС как неизвестного, так и эталонного источников?
9. Запишите и объясните физический смысл законов Ома для однородного и неоднородного участков цепи.
10. Выведите формулу (9) и поясните необходимость использования эталонного источника (в задании 1).
11. Как рассчитать величину сопротивления любого линейного резистора?
12. Почему в рассматриваемом методе определения ЭДС нужно использовать эталонированный провод (реохорд)?
13. Какова роль использованных в установке балластного R и добавочного R_0 сопротивлений?
14. Напишите и поясните суть правил Кирхгофа.

Лабораторная работа 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНА ОМА ДЛЯ УЧАСТКА ЦЕПИ, СОДЕРЖАЩЕГО ЭДС

Цель работы: экспериментально исследовать зависимость тока в цепи от разности потенциалов на неоднородном участке; снять зависимость разности потенциалов на участке от сопротивления внешней цепи.

Приборы и принадлежности: источники ЭДС ε_1 и ε_2 ; амперметр; вольтметр; магазин сопротивлений; набор резисторов для исследуемого участка $R_{\text{уч}}$; ключи.

Методические указания и описание установки

Закон Ома для неоднородного участка цепи имеет вид

$$IR = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon, \quad (1)$$

где I – ток на участке 1–2, сопротивление которого R ; $\varphi_1 - \varphi_2$ – разность потенциалов на концах этого участка; ε – ЭДС источника тока (рис. 1).

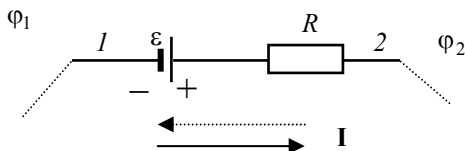


Рис. 1. Схема неоднородного участка электрической цепи

В дифференциальной форме закон Ома представляется как

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} = \sigma (\vec{E}_k + \vec{E}_{ст}), \quad (2)$$

где \vec{j} – плотность тока; σ – удельная электропроводность; $\vec{E}_{ст}$ – напряжённость поля сторонних сил, под действием которых на полюсах источника происходит накопление зарядов противоположных знаков; \vec{E}_k – напряжённость кулоновского потенциального поля, создаваемого зарядами, накопившимися на полюсах источника; \vec{E} – результирующая напряжённость поля сторонних и электрических сил.

При использовании обобщённого закона Ома (1) следует обращать внимание на принципиальное различие между понятиями разности потенциалов, электродвижущей силы и падения напряжения. Каждая из этих величин определяется как удельная работа сил поля, т.е. отношением A/q .

Разность потенциалов – это работа кулоновского потенциального поля, ЭДС – работа непотенциального поля (поля сторонних сил), локализованного внутри источника. Под падением напряжения понимают удельную работу результирующего поля электростатических и сторонних сил, и согласно (1) падение напряжения равно произведению силы тока на полное сопротивление рассматриваемого участка цепи.

Направление тока, протекающего через источник, определяется по вектору результирующей напряжённости \vec{E} . В зависимости от состава внешней цепи разность потенциалов на исследуемом участке может быть как больше нуля, так и меньше или равна нулю.

Исследование закона Ома для участка цепи, содержащего ЭДС, проводится по схеме, показанной на рис. 2. Ветвь $1 \varepsilon_1 R_{уч} 2$ – исследуемый

участок цепи, содержащий ЭДС – ε_1 . Участок 1 $\varepsilon_2 R 2$ представляет внешнюю цепь ($\varepsilon_2 > \varepsilon_1$). $R_{\text{уч}}$ – сопротивление исследуемого участка цепи, включающего сопротивление амперметра R_A , внутреннее сопротивление источника r и ступенчато меняющееся сопротивление набора резисторов. R – переменное сопротивление внешней цепи (калиброванный реостат или магазин сопротивлений).

Разность потенциалов на исследуемом участке измеряется вольтметром V с нулём в середине шкалы, а ток – амперметром A .

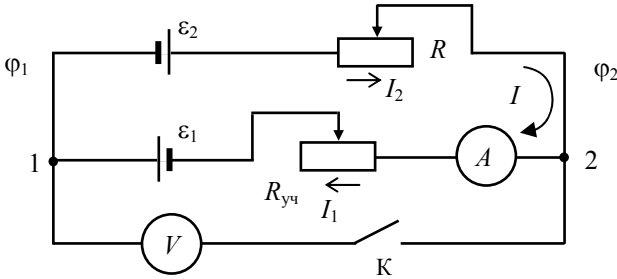


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Поскольку сопротивление вольтметра велико, так что

$$I_V \approx 0$$

и, следовательно,

$$I_1 \approx I_2 \approx I,$$

запишем соотношения:

$$IR = (\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon_2 \quad \text{и} \quad -IR_{\text{уч}} = (\varphi_1 - \varphi_2) - \varepsilon_1,$$

решая которые, получаем:

$$I = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{R + R_{\text{уч}}}. \quad (3)$$

Закон Ома для изучаемого участка $2R_{\text{уч}}\varepsilon_1 1$ (направление обхода выбрано от точки 2 к точке 1) запишется в виде

$$IR_{\text{уч}} = (\varphi_2 - \varphi_1) + \varepsilon_1,$$

откуда

$$I = \frac{(\varphi_2 - \varphi_1) + \varepsilon_1}{R_{\text{уч}}}. \quad (4)$$

Из выражений (3) и (4) находим

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \frac{\varepsilon_2 R_{yч} - \varepsilon_1 R}{R + R_{yч}}. \quad (5)$$

Из уравнения (5) следует: если $\varepsilon_2 R_{yч} > \varepsilon_1 R$, то $\varphi_2 - \varphi_1 > 0$; если $\varepsilon_2 R_{yч} < \varepsilon_1 R$, то $\varphi_2 - \varphi_1 < 0$; если $\varepsilon_2 R_{yч} = \varepsilon_1 R$, то $\varphi_2 - \varphi_1 = 0$ (см. рис. 2). Таким образом, изменяя *внешнее сопротивление цепи* R , можно получить разность потенциалов между точками 1 и 2 разной полярности и зафиксировать это по отклонению стрелки вольтметра влево или вправо от нуля шкалы. Из уравнения (4) следует, что зависимость $I = f(\varphi_2 - \varphi_1)$ является линейной функцией. При этом для графика $I = f(\varphi_2 - \varphi_1)$ угловой коэффициент прямой равен $1 / R_{yч}$, а точка пересечения графика с осью токов соответствует $I = \varepsilon_1 / R_{yч}$ при $\varphi_2 - \varphi_1 = 0$.

Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

Внимание! 1. В качестве источников ЭДС ε_1 и ε_2 в установке используется смонтированный блок, питаемый от сети 220 В. Их включение производится соответствующим выключателем (ВКЛ/ВЫКЛ). 2. Величина сопротивления $R_{yч}$ определяется положением переключателя $R_{yч}$ (положения 1 – 7). Два из этих значений задаются преподавателем.

1. Установите одно из положений переключателя $R_{yч}$.
2. Подключите установку к сети 220 В. Соответствующими выключателями включите источники питания ε_1 и ε_2 .

3. На магазине сопротивлений поставьте значение внешнего сопротивления R примерно 5...7 кОм. При периодическом кратковременном подключении вольтметра с помощью ключа К, увеличивая или уменьшая величину сопротивления R , добейтесь отклонения стрелки вольтметра на 40 – 50 делений влево от нуля шкалы. Зафиксируйте это значение сопротивления. Затем, уменьшая сопротивление магазина с периодическим кратковременным включением ключа К, добейтесь такого же отклонения стрелки вольтметра вправо от нуля шкалы. Отметьте минимальное значение сопротивления R .

4. В полученном диапазоне сопротивлений магазина выберите такие их значения (всего 9 – 11), чтобы разность потенциалов ($\varphi_1 - \varphi_2$) между этими значениями равномерно менялась от максимальной её отрицательной величины (слева от нуля шкалы) до максимальной положительной (справа) с регистрацией нулевого значения.

5. Для намеченных значений сопротивлений замерьте соответствующие им величины токов I и разности потенциалов ($\varphi_1 - \varphi_2$), учиты-

вая цену деления шкалы вольтметра. Результаты всех измерений внесите в табл. 1.

Таблица 1

$R, \text{ Ом}$								
$I, \text{ mA}$								
$\varphi_1 - \varphi_2, \text{ В}$								

Таблица 2

$R, \text{ Ом}$								
$I, \text{ mA}$								
$\varphi_1 - \varphi_2, \text{ В}$								

6. С помощью переключателя поставьте другое значение $R_{\text{уч}}$. Проделайте все операции п. 3 – 5, а полученные измерения занесите в табл. 2.

7. Используя данные измерений, постройте для обоих случаев графики зависимости $I = f(\varphi_2 - \varphi_1)$. По угловым коэффициентам полученных прямых и точкам пересечения прямых с осью ординат рассчитайте сопротивление участка $R_{\text{уч},j}$ и величину ε_1 источника тока.

8. Постройте графические зависимости $\varphi_2 - \varphi_1 = f(R)$.

Контрольные вопросы

1. Что означает понятие «неоднородный участок цепи»?
2. Напишите закон Ома для неоднородного участка.
3. Объясните физический смысл закона Ома в векторной форме.
4. Какова природа сторонних сил и их роль в электрической цепи?
5. Что такое напряжённость кулоновского потенциального поля?
6. В чём состоит различие между разностью потенциалов, электродвижущей силой и падением напряжения?
7. Чем определяется направление тока, протекающего через источник ЭДС, находящийся на неоднородном участке?
8. Нарисуйте электрическую схему используемой установки и укажите её основные элементы.
9. Напишите для исследуемого участка и участка внешней цепи уравнения по второму правилу Кирхгофа.
10. Объясните влияние величины сопротивления внешней цепи на изменение полярности разности потенциалов исследуемого участка.
11. Объясните полученные графические закономерности $I = f(\varphi_2 - \varphi_1)$ и $\varphi_2 - \varphi_1 = f(R)$.

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНА ОМА ДЛЯ ПОЛНОЙ ЦЕПИ, ЗАВИСИМОСТИ МОЩНОСТИ И КПД ИСТОЧНИКА ТОКА ОТ НАГРУЗКИ

Цель работы: научиться экспериментальным путём определять полную, полезную мощности и КПД источника тока в зависимости от величины сопротивления внешней цепи.

Приборы и принадлежности: источник тока; вольтметр; амперметр; реостат; мостик Уитстона (мост постоянного тока типа ММВ); ключи.

Методические указания и описание установки

1. Закон Ома для полной цепи имеет вид

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}, \quad (1)$$

где ε – ЭДС источника тока; R и r – сопротивления внешней цепи и внутреннее сопротивление источника. При постоянных значениях ε и r ток I является функцией от R ($I = f(R)$).

Из уравнения (1) следует, что падение напряжения на внешнем сопротивлении $U = IR = \varepsilon - Ir$ или

$$U = \frac{\varepsilon R}{R + r} = \frac{\varepsilon}{1 + \frac{r}{R}}, \quad (2)$$

т.е. при постоянных ε и r падение напряжения также является функцией R ($U = f(R)$). Видно, что $U = \varepsilon$ при $I = 0$ ($R \rightarrow \infty$ – цепь разомкнута) и $U = 0$ при $R = 0$ (короткое замыкание).

2. Полная мощность, развиваемая источником,

$$P = I\varepsilon. \quad (3)$$

3. Полезная мощность, т.е. мощность расходуемая во внешней цепи,

$$P_{\text{п}} = IU = I^2 R. \quad (4)$$

С учётом (1) получаем:

$$P_{\text{п}} = \frac{R\varepsilon^2}{(R + r)^2}. \quad (5)$$

Кроме того, учитывая, что $U = \varepsilon - Ir$, имеем

$$P_{\text{п}} = \varepsilon I - I^2 r, \quad (6)$$

где $I^2 r = P_{\text{потерь}}$ – выделяющееся внутри источника тепло, т.е. бесполезно теряемая мощность.

Из соотношения (6) видно, что зависимость полезной мощности от тока [$P_n = f(I)$] является параболической. Дифференцируя выражение (5) по R и приравняв производную нулю, можно показать, что P_n будет максимальной при $R = r$. Из (6) следует, что $P_n = 0$, когда ток в цепи равен нулю, т.е. когда цепь разомкнута ($R \gg r$), или при коротком замыкании, когда величина тока в цепи равна

$$I_{к.з.} = \frac{\varepsilon}{r} \quad (R = 0).$$

4. Коэффициент полезного действия источника тока равен

$$\eta = \frac{P_n}{P} = \frac{U}{\varepsilon} = \frac{(I\varepsilon - I^2r)}{I\varepsilon} = 1 - I \frac{r}{\varepsilon}. \quad (7)$$

Из (7) вытекает, что КПД источника может мало отличаться от единицы при малых внешних токах и будет уменьшаться по линейному закону, обращаясь в нуль при коротком замыкании, т.е. при

$$I_{к.з.} = \frac{\varepsilon}{r}.$$

Качественный характер зависимостей P , P_n и η от силы тока I показан на рис. 1.

Видно, что условия получения наибольшей полезной мощности и максимального КПД несовместимы. Когда P_n достигает наибольшего значения, сила тока равна $\varepsilon / 2r$ и $\eta = 1/2$ или 50%. Когда же КПД близок к 1, полезная мощность мала по сравнению с максимальной мощностью, которую мог бы развить источник тока.

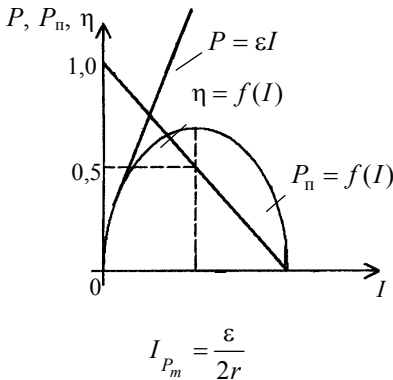


Рис. 1. Графики зависимостей $P = \varepsilon I$, $\eta = f(I)$, $P_n = f(I)$

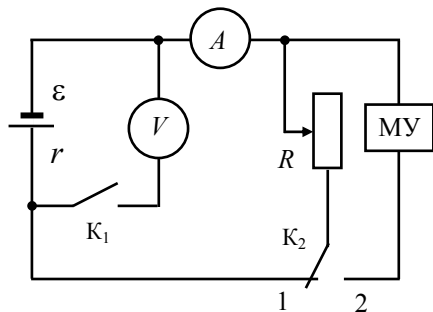


Рис. 2. Схема установки

В работе используется установка, электрическая схема которой представлена на рис. 2, где V – вольтметр с большим внутренним сопротивлением; R – реостат, значения сопротивления которого при разных положениях движка измеряются с помощью мостика Уитстона (МУ); A – амперметр; K_1 и K_2 – ключи.

Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

1. Проверьте правильность сборки установки согласно схеме на рис. 2. Выставьте на амперметре и вольтметре с помощью их переключателя необходимые пределы измеряемых величин и определите цену деления каждого. Запишите в свой отчёт класс точности приборов.

2. Подключите установку к розетке «+12 В–», укреплённой на лабораторном столе. Ключ K_2 поставьте в положение 2 (цепь реостата разомкнута), ключ K_1 замкните и замерьте вольтметром напряжение на клеммах источника (U_0). В дальнейших расчётах величину U_0 принимать равной значению ЭДС источника, т.е. $U_0 = \varepsilon$.

3. Установите максимально возможное значение внешнего сопротивления R , передвинув движок реостата в одно из крайних положений. Оставьте ключ K_2 в положении 2 и с помощью мостика Уитстона измерьте его сопротивление. Для этого установите делитель мостика на цифру 1, нажмите на кнопку питания моста и, вращая ручку кругового реохорда, подведите стрелку нуль-гальванометра точно к нулевому значению. Против стрелки вблизи кругового реохорда возьмите отсчёт величины сопротивления. Затем ключ K_2 переведите в положение 1 и снимите показания амперметра и вольтметра при данном значении R . Полученные результаты занесите в таблицу.

4. Уменьшая величину внешнего сопротивления R до минимального значения и повторяя операции п. 3, замерьте ток и напряжение для каждого из значений сопротивления. Измерения проведите для 10 – 12 значений R . Результаты внесите в таблицу.

Таблица

R , Ом									
I , А									
U , В									
P , Вт									
P_n , Вт									
η , %									

5. По полученным значениям I , U и величине ЭДС ($\varepsilon \approx U_0$) источника, для каждого значения сопротивления внешней цепи вычислите полную мощность (P), полезную мощность ($P_{\text{п}}$) и КПД источника (η) по формулам: $P = I\varepsilon$; $P_{\text{п}} = IU$; $\eta = P_{\text{п}} / P$ соответственно.

6. По экспериментальным данным постройте графики зависимостей $I = f(R)$, $U = f(R)$ и $P_{\text{п}} = f(R)$.

7. По табличным величинам постройте графики зависимостей $P = f(I)$, $P_{\text{п}} = f(I)$ и $\eta = f(I)$ (см. рис. 1). Исходя из графиков, найдите величины внутреннего сопротивления (r) источника и тока короткого замыкания ($I_{\text{к.з}}$).

Контрольные вопросы

1. Объясните физический смысл закона Ома в векторной (дифференциальной) форме.

2. Что называется КПД источника тока, его полной и полезной мощностями, током короткого замыкания?

3. Объясните изменение полярности разности потенциалов между двумя точками неоднородного участка в зависимости от величины сопротивления внешней цепи.

4. Объясните полученные графические закономерности $I = f(\varphi_1 - \varphi_2)$ и $\varphi_1 - \varphi_2 = f(R)$.

5. Закон Ома для однородного и неоднородного участка цепи в интегральной и дифференциальной формах.

6. Принципиальная схема лабораторной установки, назначение приборов и методика проведения исследования по изучению закона Ома для полной цепи.

7. Закон Ома для полной цепи. Понятие ЭДС источника тока.

8. Объясните физический смысл понятий напряжения, разности потенциалов и ЭДС.

9. Что такое электрический ток, сила тока и плотность тока?

Лабораторная работа 5

ПРОВЕРКА ПРАВИЛ КИРХГОФА ДЛЯ РАЗВЕТВЛЁННЫХ ЦЕПЕЙ

Цель работы: экспериментально проверить правила Кирхгофа для сложной цепи постоянного тока.

Приборы и принадлежности: источники постоянного тока; резисторы; вольтметр; переключатель резисторов; ключи.

Методические указания и описание установки

Правила Кирхгофа применяются при расчёте сложных электрических цепей постоянного тока, имеющих несколько точек разветвления (узлов) и содержащих несколько источников ЭДС. Они являются следствием законов сохранения заряда и энергии.

I правило: алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю:

$$\sum_{i=3}^n I_i = 0. \quad (1)$$

Количество уравнений, составленных по первому правилу, на одно меньше количества узлов.

II правило: в любом произвольно выбранном замкнутом контуре разветвлённой электрической цепи алгебраическая сумма падений напряжений на участках контура равна алгебраической сумме ЭДС, действующих в этом контуре:

$$\sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{j=0}^m \varepsilon_j. \quad (2)$$

Количество уравнений, составленных по второму правилу, равно числу независимых контуров.

Число независимых уравнений, составленных по правилам Кирхгофа, должно быть равно числу токов, идущих в разветвлённой цепи.

Измерив значение падения напряжения на каждом известном по величине резисторе, определяются силы токов в них: I_1, I_2, \dots, I_n . Алгебраическое суммирование токов в узле должно удовлетворять уравнению (1).

Зная величины токов I_1 и I_5 (рис. 1), а также падение напряжения δU_1 и δU_2 на источниках ε_1 и ε_2 при замкнутой цепи и значения самих ε_1 и ε_2 при разомкнутой цепи, рассчитываются величины внутренних сопротивлений r_1 и r_2 источников тока:

$$r_1 = \frac{\varepsilon_1 - \varphi_1}{I_1} = \frac{\delta U_1}{I_1}; \quad r_2 = \frac{\varepsilon_2 - \varphi_2}{I_5} = \frac{\delta U_2}{I_5}, \quad (3)$$

где φ_1 и φ_2 – разности потенциалов на клеммах этих источников при замкнутой цепи.

По падению напряжений на всех сопротивлениях, входящих в какой-либо выделенный из сложной цепи замкнутый контур, проверяется II правило Кирхгофа.

Работа выполняется на установке, электрическая схема которой показана на рис. 1. Здесь $R_1 - R_6$ – известные сопротивления, ε_1 и ε_2 – источники постоянных ЭДС.

Внимание! Сопротивление R_2 представляет собой блок из 10 отдельных резисторов, подсоединяемых в цепь с помощью переключателя.

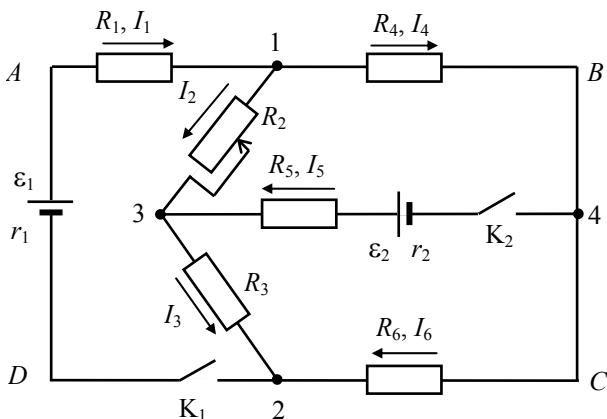


Рис. 1. Электрическая схема установки

Падения напряжений на отдельных участках цепи измеряются вольтметром (V). Так как сопротивление вольтметра много больше любого резистора в цепи, то его подключение практически не влияет на величину тока в конкретном сопротивлении и распределение токов во всей цепи. Значения ЭДС ε_1 и ε_2 , сопротивлений $R_1 - R_6$ подобраны такими, чтобы направления токов совпадали с указанными на рис. 1, а величины напряжений U_j были всегда положительными.

Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

1. Ознакомьтесь с установкой и проверьте правильность подключения каждого элемента согласно схеме на рис. 1.
2. Определите цену деления вольтметра V и запишите в отчёт класс его точности.
3. Переключателем сопротивления R_2 поставьте одно из двух выбранных или заданных преподавателем значений.
4. Подключите, соблюдая полярность, выходы источника ε_1 к розетке «+40 В», а источника ε_2 к розетке «+12 В», установленным на лабораторном столе.
5. При разомкнутых ключах K_1 и K_2 , используя переключатель вольтметра, замерьте величины ЭДС ε_1 и ε_2 , результаты занесите в табл. 1.
6. Замкните ключи K_1 и K_2 и замерьте значения φ_1 и φ_2 , а также падения напряжений U_j на всех сопротивлениях, поочередно меняя положение переключателя вольтметра. Все данные занесите в табл. 1.

7. Переключателем сопротивления R_2 поставьте другое его значение. Прделайте все операции п. 5 и 6, а полученные результаты внесите в табл. 2.

Таблица 1

R_i	$\varepsilon_1, \text{В}$	$\varphi_1, \text{В}$	$\varepsilon_2, \text{В}$	$\varphi_2, \text{В}$	$U_i, \text{В}$	$\Delta U_i, \text{В}$	$I_i, \text{А}$	$r_1, \text{Ом}$	$r_2, \text{Ом}$
R_1									
...						
R_6									

Таблица 2

R_i	$\varepsilon_1, \text{В}$	$\varphi_1, \text{В}$	$\varepsilon_2, \text{В}$	$\varphi_2, \text{В}$	$U_j, \text{В}$	$\Delta U_j, \text{В}$	$I_j, \text{А}$	$r_1, \text{Ом}$	$r_2, \text{Ом}$
R_1									
...						
R_6									

8. По замеренным напряжениям U_i и U_j на каждом сопротивлении и величинам самих сопротивлений, по закону Ома рассчитайте токи $I_1 - I_6$ на каждом участке для обоих значений R_2 и запишите их в табл. 1 и 2.

9. Проведите проверку первого правила Кирхгофа (1) для всех узлов цепи. Например, для узла 1:

$$\sum I = I_1 - I_2 - I_4 = \frac{U_1}{R_1} - \frac{U_2}{R_2} - \frac{U_4}{R_4} = 0.$$

За счёт погрешностей ΔU и ΔR сумма токов $\sum I_{i,j}$ может отличаться от нуля не более чем на величину

$$\sum \Delta \left(\frac{U}{R} \right) = \frac{R_1 \Delta U_1 + U_1 \Delta R_1}{R_1^2} + \frac{R_2 \Delta U_2 + U_2 \Delta R_2}{R_2^2} + \frac{R_4 \Delta U_4 + U_4 \Delta R_4}{R_4^2},$$

при этом погрешности ΔU берутся по классу точности вольтметра, а значения сопротивлений и их погрешности указаны на установке.

10. По формулам (3) найдите величины внутренних сопротивлений r_1 и r_2 источников ЭДС ε_1 и ε_2 . Внесите их в табл. 1 и 2.

11. Используя найденные значения токов, известные величины сопротивлений и ЭДС источников, проверьте уравнение (2) для трёх независимых контуров (указать, каких именно). Несовпадение $\sum \varepsilon_{i,j}$ с $\sum I_{i,j} R_{i,j}$ не должно превышать величины $\sum \Delta \varepsilon_{i,j} + \sum \Delta U_{i,j}$. Погрешность $\Delta \varepsilon_{i,j}$ также берётся по классу точности вольтметра.

12. Проанализируйте полученные результаты и сделайте выводы.

Контрольные вопросы

1. Используя уравнение непрерывности и закон Ома для неоднородного участка цепи, выведите правила Кирхгофа.

2. Что такое узел, участок, замкнутый контур, независимый контур в разветвлённой электрической схеме?

3. Сколько уравнений необходимо составлять, используя первое правило Кирхгофа? Второе правило Кирхгофа? Какие правила для выбора знаков для токов и ЭДС источников применяются при составлении уравнений?

4. Используя правила Кирхгофа, составьте необходимое число уравнений для нахождения токов во всех участках конкретной электрической схемы, предложенной преподавателем.

5. Используя результаты измерений и расчётов, выполненных в этой работе, докажите справедливость I и II правил Кирхгофа на примерах узлов, замкнутых контуров, выбранных в электрической схеме, которая изучалась в работе.

6. Что такое электрический ток, сила тока, плотность тока?

7. Получите и сформулируйте законы Ома для однородного и неоднородного участков цепи в дифференциальной форме.

8. Дать понятие о электродвижущей силе источника тока, сторонних силах, напряжённости поля сторонних сил.

9. Работа и мощность электрического тока. Закон Джоуля–Ленца.

10. Принципиальная схема лабораторной установки, назначение приборов и методика проведения исследования в данной работе.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ВЕКТОРА ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Цель работы: определить горизонтальную составляющую вектора индукции магнитного поля Земли с помощью тангенс-гальванометра.

Приборы и принадлежности: тангенс-гальванометр; источник постоянного тока; переключатель; реостат; миллиамперметр.

Методические указания и описание установки

Вокруг Земли существует магнитное поле. Если поместить в магнитное поле Земли подвешенную на нити магнитную стрелку, которая может вращаться вокруг горизонтальной оси, то она будет стремиться установиться вдоль направления вектора индукции магнитного поля Земли. Плоскость, в которой устанавливается магнитная стрелка, называется плоскостью магнитного меридиана. Магнитный меридиан не совпадает с географическим меридианом.

Магнитное поле Земли характеризуется тремя основными параметрами. Угол склонения – угол между направлениями географического и магнитного меридианов в данной точке; горизонтальная составляющая земного магнетизма B_0 , которая определяется проекцией вектора магнитной индукции на горизонтальную плоскость; магнитное наклонение – угол, который образует вектор магнитной индукции в данной точке с горизонтальной плоскостью.

В данной работе определяется горизонтальная составляющая B_0 при помощи тангенс-гальванометра (тангенс-буссоли). Тангенс-гальванометр состоит из большого вертикального кольца с небольшим числом витков (плоская катушка). В центре катушки в горизонтальной плоскости находится небольшая магнитная стрелка, которая в отсутствие других магнитных полей всегда устанавливается вдоль магнитного меридиана Земли (компас). При пропускании тока по виткам катушки возникает магнитное поле тока, перпендикулярное плоскости катушки. Величина вектора магнитной индукции этого поля в центре катушки согласно закону Био-Савара–Лапласа равна

$$B_T = \mu_0 \frac{IN}{2R}, \quad (1)$$

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

При совместном действии магнитных полей Земли и тока магнитная стрелка тангенс-гальванометра повернется на некоторый угол α и займет

положение, совпадающее с результирующей векторов \vec{B}_0 и \vec{B}_T . В случае ортогональности этих векторов (рис. 1, а), следует

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{B_T}{B_0}, \quad (2)$$

где B_0 – проекция вектора индукции магнитного поля Земли на горизонталь.

Подставляя значение \vec{B}_T из (1), получим

$$B_0 = \mu_0 \frac{IN}{2R \operatorname{tg} \alpha} \quad \text{или} \quad B_0 = \frac{\mu_0 N}{2R} \frac{I}{\operatorname{tg} \alpha}. \quad (3)$$

Если B_0 известно, то по (3) можно определить ток в катушке, который оказывается пропорциональным $\operatorname{tg} \alpha$, поэтому прибор и был назван тангенс-гальванометром.

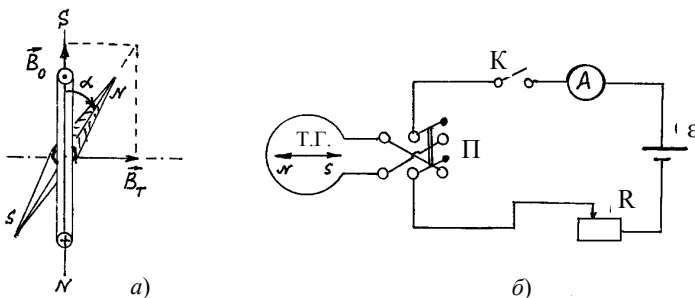


Рис. 1. Схема тангенс-гальванометра (а) и электрической цепи (б)

Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

1. Ознакомьтесь с установкой (рис. 1, б), которая состоит из тангенс-гальванометра (Т.Г.), источника тока (ϵ) на 12 В, переключателя (П), реостата (R), миллиамперметра (A).

2. Установите плоскость катушки тангенс-гальванометра в плоскости магнитного меридиана (по направлению магнитной стрелки). При этом следует учесть то, что вблизи прибора не должны находиться стальные предметы.

3. Замокните ключом (K) цепь и установите с помощью реостата ток, вызывающий отклонение магнитной стрелки на угол $20 \dots 25^\circ$. Отсчитайте угол α'_1 и измерьте ток по миллиамперметру. Занесите их в таблицу.

4. Не изменяя величины тока, переключателем измените направление тока в катушке и отсчитайте угол α''_1 (этим исправляется ошибка измерения, вносимая неточной установкой катушки в плоскости магнитного

меридиана и влиянием стальных предметов, находящихся в лаборатории). Найдите среднее арифметическое двух измерений и внесите в таблицу.

5. Повышая ступенчато ток, повторите п.п. 3 и 4 ещё для четырёх измерений. При этом, отклонение магнитной стрелки желательнее брать в интервале углов $25 \dots 50^\circ$.

6. Определите для каждого измерения по формуле (3) горизонтальную составляющую вектора индукции магнитного поля Земли B_0 и её среднее значение, все данные запишите в таблицу.

7. Найдите для одного опыта относительную и абсолютную ошибки измерения B_0 .

Относительную ошибку определите по формуле

$$E = \frac{\Delta B_0}{B_0} = \frac{\Delta \mu_0}{\mu_0} + \frac{\Delta N}{N} + \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta R}{R} + \frac{2\Delta\alpha}{\sin 2\alpha}.$$

Ошибками $\Delta \mu_0$ и ΔN можно пренебречь, а ошибка $\Delta \alpha$ берётся в радианах, равная половине цены деления шкалы компаса, выраженной также в радианах. Погрешность ΔI определите по классу точности миллиамперметра.

8. Ответ представьте в виде $B_0 = B_0 \pm \Delta B_0$.

Таблица

№ п/п	I , мА	α_i		$\bar{\alpha}_i = \frac{\alpha'_i + \alpha''_i}{2}$	$\text{tg}\alpha_i$	B_{0i} , Тл	ΔB_{0i}
		α'_i	α''_i				
1...							
...							
5						B_{0cp}	ΔB_{0cp}

Контрольные вопросы

1. При каких условиях возникает магнитное поле?
2. Поясните основные характеристики магнитного поля. Единицы их измерения.
3. Как графически изображается магнитное поле?
4. Каковы основные характеристики магнитного поля Земли?
5. Определите суть метода определения B_0 .
6. Сформулируйте закон Био–Савара–Лапласа и получите формулу для магнитной индукции в центре кругового тока, вблизи бесконечного прямолинейного проводника с током, на оси кругового тока.
7. Как проявляется защитная роль магнитного поля Земли для жизни на ней?

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА «МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА»

Цель работы: ознакомиться с методом создания взаимно перпендикулярных электрического и магнитного полей, движением электронов в таких скрещенных полях. Экспериментально определить величину удельного заряда электрона.

Приборы и принадлежности: электронная лампа 6Е5С; соленоид; источник питания ВУП-2М; миллиамперметр; амперметр; вольтметр; потенциометр; соединительные провода.

Методические указания и описание установки

В основе одного из экспериментальных методов определения удельного заряда электрона (отношение заряда электрона к его массе e/m) лежат результаты исследований движения заряженных частиц во взаимно перпендикулярных магнитном и электрическом полях. При этом траектория движения зависит от отношения заряда частицы к её массе. Название применяемого в работе метода обусловлено тем, что подобное движение электронов в магнитном и электрическом полях такой же конфигурации осуществляется в магнетронах – приборах, используемых для генерации мощных электромагнитных колебаний сверхвысокой частоты.

Основные закономерности, поясняющие данный метод, можно выявить, рассмотрев для простоты движение электрона, влетающего со скоростью V в однородное магнитное поле, вектор индукции которого перпендикулярен направлению движения. Как известно, в этом случае на электрон при его движении в магнитном поле действует максимальная сила Лоренца $F_{\text{л}} = eVB$, которая перпендикулярна скорости электрона, и, следовательно, является центростремительной силой. При этом движение электрона совершается по окружности, радиус которой определяется условием

$$eVB = \frac{mV^2}{r} \quad (1)$$

или

$$r = \frac{mV}{eB}, \quad (2)$$

где e , m , V – заряд, масса и скорость электрона соответственно; B – значение индукции магнитного поля; r – радиус окружности.

Из соотношения (2) видно, что радиус кривизны траектории движения электрона будет уменьшаться с увеличением индукции магнитного поля и увеличиваться с ростом его скорости.

Выражая величину удельного заряда из (1), получаем

$$\frac{e}{m} = \frac{V}{rB}. \quad (3)$$

Из (3) следует, что для определения отношения e/m необходимо знать скорость движения электрона V , значение индукции магнитного поля B и радиус кривизны траектории электрона r .

На практике для моделирования такого движения электронов и определения указанных параметров поступают следующим образом. Электроны с определённым направлением вектора скорости движения получают с помощью двухэлектродной электронной лампы с анодом, изготовленным в виде цилиндра, вдоль оси которого расположен нитевидный катод. При приложении разности потенциалов (анодного напряжения U_a) в кольцевом пространстве между анодом и катодом создаётся радиально направленное электрическое поле, под действием сил которого электроны, вылетающие из катода за счёт термоэлектронной эмиссии, будут двигаться прямолинейно вдоль радиусов анода, и миллиамперметр, включённый в анодную цепь, покажет определённое значение анодного тока I_a . Перпендикулярное электрическому, а следовательно, и скорости движения электронов, однородное магнитное поле получают, размещая лампу в средней части соленоида таким образом, чтобы ось соленоида была параллельна оси цилиндрического анода. В этом случае, при пропускании по обмотке соленоида тока I_c магнитное поле, возникающее в кольцевом пространстве между анодом и катодом, искривляет прямолинейную траекторию движения электронов. По мере увеличения тока соленоида I_c и, следовательно, величины магнитной индукции B , радиус кривизны траектории движения электрона будет уменьшаться. Однако при небольших значениях магнитной индукции ($B \rightarrow 0$) все электроны, ранее достигавшие анода, будут по-прежнему попадать на анод, а миллиамперметр фиксировать постоянное значение анодного тока I_a (рис. 1). При некотором, так называемом *критическом значении магнитной индукции* ($B_{кр}$), электроны будут двигаться по траекториям, касательным к внутренней поверхности цилиндрического анода, т.е. уже перестанут достигать анода, что приводит к резкому уменьшению анодного тока и его полному прекращению при значениях $B > B_{кр}$.

Вид идеальной зависимости $I_a = f(B)$, или так называемой *сбросовой характеристики*, показан на рис. 1 пунктиром (a). На этом же рисунке схематично показаны траектории движения электронов в пространстве между анодом и катодом при различных значениях индукции магнитного поля.

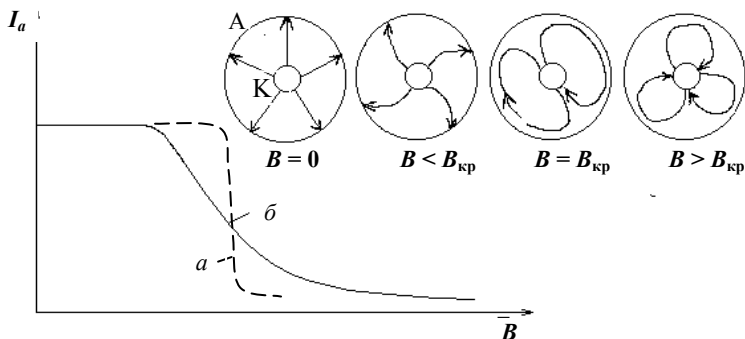


Рис. 1. Идеальная (а) и реальная (б) сбросовые характеристики

Следует отметить, что на самом деле траектории движения электронов в магнитном поле уже не являются окружностями, а линиями с переменным радиусом кривизны. Это объясняется тем, что скорость электрона непрерывно меняется за счёт ускорения, передаваемого ему силами электрического поля. Поэтому точный расчёт траектории электронов довольно сложен. Однако при радиусе анода r_a гораздо большем, чем радиус катода ($r_a \gg r_k$), полагают, что основное увеличение скорости электронов под действием электрического поля происходит в области, близкой к катоду, где напряжённость электрического поля максимальна, а значит, и наибольшее ускорение, сообщаемое электронам. Дальнейший путь электрон пройдёт почти с постоянной скоростью, и его траектория будет близка к окружности.

В связи с этим, при критическом значении магнитной индукции $B_{кр}$ за радиус кривизны траектории движения электрона принимают расстояние, равное половине радиуса анода лампы, применяемой в установке, т.е.

$$r_{кр} = \frac{r_a}{2}. \quad (4)$$

Скорость электрона определяется из условия равенства его кинетической энергии работе, затрачиваемой электрическим полем на сообщение ему этой энергии:

$$\frac{mV^2}{2} = eU_a, \quad (5)$$

где U_a – разность потенциалов между анодом и катодом лампы.

Подставляя значения скорости из (5), радиуса траектории $r_{кр}$ из (4) в (3) при критическом значении индукции магнитного поля, получаем выражение для отношения e/m в виде

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{r_a^2 B_{\text{кр}}^2}. \quad (6)$$

Уточнённый расчёт с учётом радиуса катода (r_k) даёт соотношение для определения удельного заряда электрона:

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{r_a^2 B_{\text{кр}}^2 \left(1 - \frac{r_k^2}{r_a^2}\right)}. \quad (7)$$

Для соленоида конечной длины значение критической индукции магнитного поля в центральной его части следует рассчитывать по формуле

$$B_{\text{кр}} = \frac{\mu_0 (I_c)_{\text{кр}} N}{\sqrt{4R^2 + L^2}}, \quad (8)$$

где N – число витков соленоида; L , R – длина и среднее значение радиуса соленоида; $(I_c)_{\text{кр}}$ – ток соленоида, соответствующий критическому значению магнитной индукции.

Подставляя $B_{\text{кр}}$ в (7), получаем окончательное выражение для удельного заряда:

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a (4R^2 + L^2)}{\mu_0^2 r_a^2 (I_c)_{\text{кр}}^2 N^2 \left(1 - \frac{r_k^2}{r_a^2}\right)}. \quad (9)$$

Поскольку согласно (8) $B \sim I_c$, то опыт сводится к снятию *сбросовой характеристики*, т.е. зависимости анодного тока от тока соленоида $I_a = f(I_c)$.

Необходимо отметить, что в отличие от идеальной сбросовой характеристики (рис. 1, а), реальная характеристика имеет менее крутую падающую часть (рис. 1, б). Это объясняется тем, что электроны испускаются нагретым катодом с различными начальными скоростями. Распределение электронов при термоэмиссии по скоростям близко к известному закону распределения Максвелла молекул по скоростям в газе.

В связи с этим, критические условия для разных электронов достигаются при разных значениях тока соленоида, что приводит к сглаживанию кривой $I_a = f(I_c)$. Так как, согласно распределению Максвелла, из всего потока электронов, испускаемых катодом, большая часть имеет начальную скорость, близкую к вероятной для определённой температуры катода, то наиболее резкий спад сбросовой характеристики наблюдается при достижении током соленоида критического значения $(I_c)_{\text{кр}}$ именно для этой группы электронов. Поэтому для определения значения критическо-

го тока применяют метод графического дифференцирования. С этой целью одновременно с графиком зависимости $I_a = f(I_c)$ строят зависимость

$$\frac{\Delta I_a}{\Delta I_c} = f(I_c)$$

при тех же значениях тока соленоида. ΔI_a – приращение анодного тока при соответствующем изменении тока соленоида ΔI_c . Примерный вид сбросовой характеристики $I_a = f(I_c)$ (а) и функции $\frac{\Delta I_a}{\Delta I_c} = f(I_c)$ (б) показан на рис. 2.

Значение критического тока соленоида (I_c)_{кр}, соответствующее максимуму кривой $\frac{\Delta I_a}{\Delta I_c} = f(I_c)$, принимается для расчётов $B_{кр}$ по формуле (8).

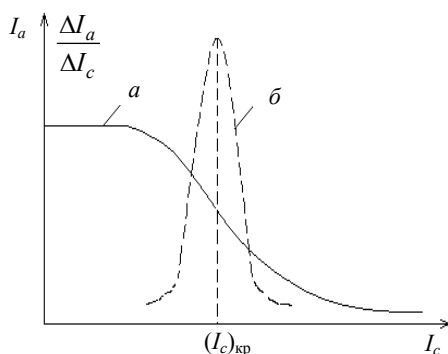


Рис. 2. Сбросовая (а) и дифференциальная (б) характеристики лампы

Установка собрана на лампе 6Е5С. Электрическая схема установки представлена на рис. 3.

Питание лампы постоянным током осуществляется от выпрямителя ВУП-2М, в котором с помощью кругового потенциометра (на лицевой стороне ручка 0...100 В) регулируется величина напряжения между анодом и катодом. Катод лампы нагревается переменным током с напряжением ~6,3 В, снимаемым с соответствующих клемм выпрямителя. Выпрямитель подсоединяется к сетевой розетке «220 В», укрепленной на лабораторном столе.

Соленоид L через потенциометр R запитывается от источника постоянного тока, выведенного на розетку ± 40 В, укрепленную так же на лабораторном столе. Ток соленоида замеряется амперметром с пределами 0...3 А, анодный ток фиксируется миллиамперметром с пределами 0...2 мА, анодное напряжение – вольтметром с пределами измерения 0...150 В.

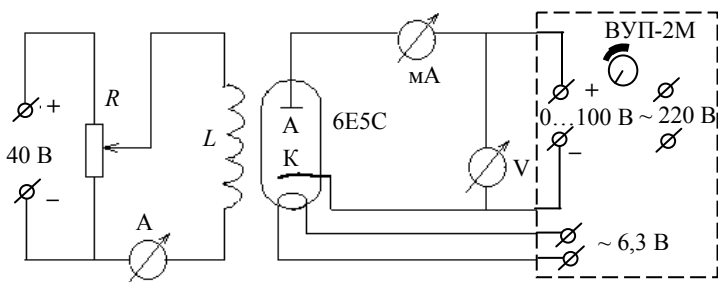


Рис. 3. Электрическая схема установки:

ВУП-2М – выпрямитель; R – потенциометр $0 \dots 30$ Ом; A – амперметр $0 \dots 2$ А; L – соленоид; mA – миллиамперметр $0 \dots 2$ мА; V – вольтметр $0 \dots 100$ В

Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

1. Проверьте правильность сборки всех элементов электрической цепи установки по схеме рис. 3. На измерительных приборах *выставьте соответствующие пределы измеряемых величин* и определите *цену деления* каждого из них.

2. Подсоедините выпрямитель ВУП-2М к розетке «220 В», а выходы потенциометра R к розетке «+40 В–». Подсоедините выход накала лампы к клеммам выпрямителя «~6,3 В».

3. Ручкой потенциометра ($0 \dots 100$ В) выпрямителя по вольтметру установите одно из трёх заданных преподавателем значений анодного напряжения (U_{a1}).

4. При нулевом токе в соленоиде отметьте максимальное значение анодного тока (I_a)_{max}. Затем, увеличивая с помощью потенциометра R ток в соленоиде (I_c) через определённый интервал (например, $\Delta I_c = 0,1$ А), каждый раз фиксируйте величину анодного тока. Сделайте не менее 15...18 измерений. Полученные величины I_c и I_a занесите в табл. 1.

5. Поставьте по вольтметру другое заданное напряжение (U_{a2}) и повторите все операции по п. 4. Новые данные внесите в табл. 2. Аналогичные измерения проведите и для напряжения (U_{a3}), а полученные замеры занесите в табл. 3.

6. Для каждого значения анодного напряжения постройте графические зависимости $I_a = f(I_c)$. На эти же графики нанесите зависимости производной анодного тока (dI_a) от тока соленоида, т.е. $\frac{\Delta I_a}{\Delta I_c} = f(I_c)$, и по ним

определите критические величины тока соленоида (I_c)_{кр}, как схематично показано на рис. 2.

Таблицы 1 – 3

№ п/п	Ток соленоиды I_c , А	Ток анода I_a , мА	Приращение тока соленоиды ΔI_c , А	Приращение анодного тока ΔI_a , мА	$\frac{\Delta I_a}{\Delta I_c}$	$(I_c)_{кр}$, А	$B_{кр}$, Тл	$\frac{e}{m}$, Кл/кг
Напряжение анод – катод U_{a1}								
1... ...18								
Напряжение анод – катод U_{a2}								
1... ...18								
Напряжение анод – катод U_{a3}								
1... ...18								

7. Найденные значения $(I_c)_{кр}$ подставьте в формулу (8) и оцените величины критической индукции ($B_{кр}$) магнитного поля для всех значений анодного напряжения.

8. По формулам (7) и (9) рассчитайте три значения удельного заряда электрона $(e/m)_{1,2,3}$. Найдите его среднее значение и сравните с табличной величиной.

9. Рассчитайте относительную погрешность в определении искомой величины (e/m) по формуле

$$E = \frac{\Delta(e/m)}{(e/m)_{ср}} = \frac{\Delta U_a}{U_a} + \frac{2\Delta\mu_0}{\mu_0} + \frac{2\Delta r_a}{r_a} + \frac{2(\Delta I_c)_{кр}}{(I_c)_{кр}} + \frac{\Delta R \cdot R + \Delta L \cdot L}{R^2 + L^2} + \frac{2\Delta N}{N} + \frac{2\Delta r_k}{r_k}.$$

Значения R , L , N , r_a , r_k приведены на установке, а их погрешности возьмите согласно известным правилам для постоянных величин. Ошибками $\Delta\mu_0$ и ΔN можно пренебречь. Погрешности $(\Delta I_c)_{кр}$ и ΔU_a определите по классу точности амперметра и вольтметра.

10. По относительной ошибке найдите абсолютную погрешность $\Delta(e/m)$, все вычисленные величины впишите в табл. 1 – 3, а окончательный результат дайте в виде $e/m = (e/m)_{ср} \pm \Delta(e/m)$.

11. Проанализируйте полученные результаты и сделайте выводы.

Контрольные вопросы

1. Что такое термоэлектронная эмиссия? Поясните распределение электронов по скоростям при термоэлектронной эмиссии.
2. Расскажите об устройстве электронной лампы, токе в вакууме и от чего зависит его величина.
3. Как можно оценить величину скорости электрона, движущегося в электрическом поле?
4. Объясните различие действия электрического и магнитного полей на движущиеся заряженные частицы.
5. Как будет двигаться заряженная частица в случае произвольной взаимной ориентации магнитного и электрического полей?
6. При каких условиях траектория движения заряженной частицы, находящейся в магнитном поле, является окружностью?
7. Расскажите об устройстве установки и сути «метода магнетрона» для определения удельного заряда электрона.
8. Что такое критический ток соленоида, критическое значение магнитной индукции?
9. Объясните траектории движения электронов от катода к аноду при токе соленоида $I_c < I_{кр}$, $I_c = I_{кр}$, $I_c > I_{кр}$.
10. Выведите формулы (6), (8).
11. Объясните принципиальное различие идеальной и реальной сбросовых характеристик электронной лампы.
12. Какова роль магнитного поля в современных ускорителях заряженных частиц? Назовите типы ускорителей.

Лабораторная работа 8

СНЯТИЕ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ ЖЕЛЕЗА ПО МЕТОДУ СТОЛЕТОВА

Цель работы: знакомство с баллистическим методом физических измерений и получение зависимости интенсивности намагничивания железа от напряжённости магнитного поля.

Приборы и принадлежности: баллистический гальванометр; тороид с первичной и вторичной обмотками; амперметр; источники питания; реостаты; ключи.

Методические указания и описание установки

Применённый А. Г. Столетовым метод основан на измерении магнитного потока Φ в тороиде с помощью баллистического гальванометра.

Магнитный поток в кольце создаётся первичной обмоткой (рис. 2), которая имеет N_1 витков, равномерно намотанных вдоль всего кольца.

При пропускании тока i по обмотке N_1 возникает магнитное поле, напряжённость H которого

$$H = \frac{iN_1}{l} = in, \quad (1)$$

где l – длина тороида вдоль осевой линии; n – число витков на единицу длины.

Варьированием величины тока в катушке, вместе с напряжённостью H меняется и индукция B магнитного поля в сердечнике (магнитное поле в тороиде однородно). Определение индукции B , соответствующей значению напряжённости H , основано на явлении электромагнитной индукции.

При изменении направления тока в первичной катушке на противоположное, индукция и магнитный поток Φ в тороиде изменяются от $+B$ и $+\Phi$ до $-B$ и $-\Phi$. Полное изменение магнитного потока $\Delta\Phi = \Phi - (-\Phi) = 2\Phi$. Так как магнитный поток через один виток $\Phi = BS$, то $\Delta\Phi = 2BS$, где S – сечение тороида. Этот магнитный поток, пронизывая каждый из витков вторичной обмотки N_2 , соединённой с баллистическим гальванометром, вызывает в ней возникновение ЭДС-индукции, величина которой определяется соотношением

$$\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} N_2 = -\frac{2BS}{\Delta t} N_2, \quad (2)$$

а обусловленный ею индукционный ток находится по закону Ома для полной цепи

$$i_S = \frac{\varepsilon_i}{R_{\Pi}} = -\frac{2BS}{\Delta t R_{\Pi}} N_2, \quad (3)$$

где Δt – время изменения магнитного потока; R_{Π} – полное сопротивление вторичной цепи.

Возникающий индукционный ток соответствует количеству электричества, проходящего по вторичной цепи за время действия ЭДС:

$$\Delta q = i_S \Delta t = -\frac{2BS}{R_{\Pi}} N_2, \quad (4)$$

которое измеряется с помощью баллистического гальванометра, при этом

$$\Delta q = C_6 n, \quad (5)$$

здесь C_6 – баллистическая постоянная гальванометра; n – отброс светового «зайчика» по шкале гальванометра.

Приравняв правые части уравнений (4) и (5), находим, что индукция

$$B = \frac{nC_6 R_{\Pi}}{2SN_2}. \quad (6)$$

Вектор магнитной индукции \vec{B} представляет собой сумму внешнего магнитного поля \vec{B}_0 ($\vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H}$) и внутреннего собственного магнитного поля магнетика \vec{B}' ($\vec{B}' = \mu_0 \vec{I}$). Величина \vec{I} – вектор намагниченности магнетика или суммарный магнитный момент единицы объёма магнетика. Таким образом,

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{I}),$$

и намагниченность

$$\vec{I} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{H}. \quad (7)$$

Важной характеристикой магнетика (тороида) является физическая величина, называемая относительной магнитной проницаемостью μ :

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}, \quad (8)$$

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

Качественные характеристики зависимостей вектора намагниченности \vec{I} , вектора индукции \vec{B} и относительной магнитной проницаемости μ от изменений внешнего намагничивающего поля \vec{H} приведены на рис. 1.

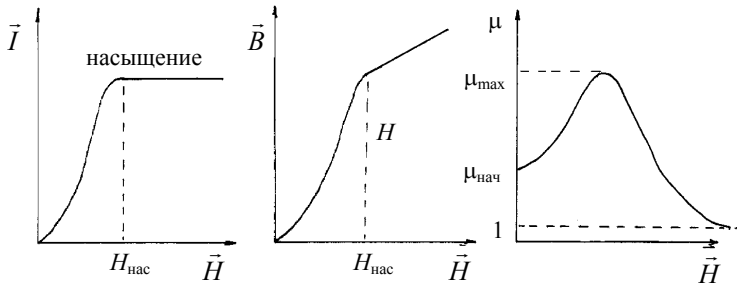


Рис. 1. Зависимости I , B и μ от H

Постоянные величины C_0 , R_n , l , S , N_1 , N_2 приведены на установке.

С помощью реостатов R , включённых в схему (рис. 2), меняется ток i в первичной катушке. Двойным ключом K осуществляется подключение этой обмотки к источнику питания постоянным током 12 В, а путём его перебрасывания из одного положения в другое, за счёт изменения направления тока в катушке N_1 , осуществляется перемагничивание и размагничивание тороида. Ключ K_1 дополнительно замыкает и размыкает первичную цепь. Ключ K_2 во вторичной цепи необходим для её размыкания во время уста-

новки тока в первичной обмотке и при размагничивании тороида. В момент измерения отброса светового «зайчика» ключ K_2 должен быть замкнут.

Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

1. Ознакомьтесь с установкой и проверьте правильность подключения всех элементов по схеме (рис. 2).

2. Включите осветитель (Л) гальванометра, подключив его шнур питания в розетку «220 В», установленную на лабораторном столе, и определите деление шкалы n_0 гальванометра, которое соответствует исходному положению светового «зайчика».

3. Подключите шнур питания установки в розетку «+12 В», укрепленную на столе. Ключ K_2 – разомкните, а K_1 – замкните. Ключ К может находиться в любом положении: верхнем или нижнем. С помощью реостата R установите по амперметру ток $1,2 \dots 1,5$ А. Произведите размагничивание тороида, перебросив 8 – 10 раз ключ К сверху вниз и наоборот, оставив его в нейтральном положении.

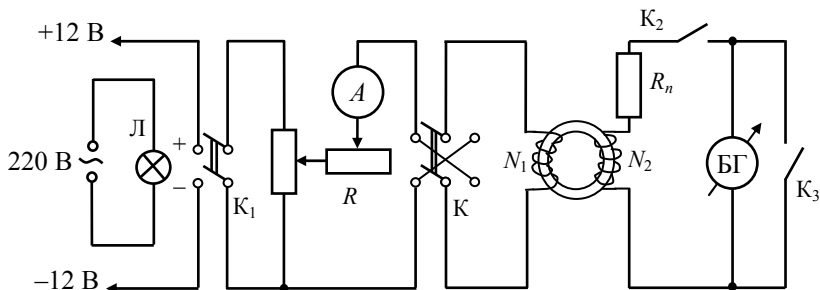


Рис. 2. Электрическая схема установки

4. При *нейтральном положении* ключа К ручку реостата сдвиньте влево до упора. Поставьте ключ К в верхнее положение. По амперметру выставьте минимальный ток ($\sim 0,05$ А). Ключ K_3 разомкните, ключ K_2 замкните и быстро перебросьте ключ К сверху вниз, одновременно регистрируя первое отклонение светового «зайчика» баллистического гальванометра (если исходное значение «зайчика» близко к нулю шкалы гальванометра, и «зайчик» отклоняется влево, в дальнейшем, ключ К следует перебрасывать снизу вверх). Величину тока и отклонение «зайчика» $(n - n_0) \times 10$ или $(n - n_0) \times 20$ (указано на гальванометре) занесите в таблицу.

5. Разомкните ключ K_2 . Реостатом увеличьте ток до 0,1 А. Замкните ключ K_2 , быстро перебросьте ключ К сверху вниз (снизу вверх) и зафиксируйте первое отклонение светового «зайчика». С учётом n_0 данные занесите в таблицу.

6. Постепенно увеличивая ток, вначале через 0,05 до 0,3 А, а далее через 0,1 А до $1,2 \dots 1,5$ А и повторяя операции п. 5, произведите не менее

15 – 18 опытов. Значения токов и соответствующие им отклонения «зайчика» запишите в таблицу.

Таблица

№ <i>n/n</i>	<i>i</i> , А	$(n - n_0) \times 10$ или $[(n - n_0) \times 20]$	H_i , А/м	B_i , Тл	I_i , А/м	μ
1						
...						
...						
15						

7. По формуле (1) рассчитайте величины напряжённостей H_i для всех значений токов i .

8. По формуле (6) найдите значения индукции \vec{B}_i магнитного поля тороида для соответствующих величин напряжённостей H_i .

9. По формулам (7) и (8) рассчитайте намагничённость \vec{I} и относительную магнитную проницаемость μ для различных значений магнитных полей. Все полученные данные занесите в таблицу.

10. По результатам расчётов постройте графики зависимостей:

$$\vec{B} = f_1(\vec{H}); \quad \vec{I} = f_2(\vec{H}); \quad \mu = f_3(\vec{H}).$$

11. Произведите расчёт относительной и абсолютной ошибок для одной из пар величин \vec{H} и \vec{B} .

12. Проанализируйте полученные зависимости и сделайте выводы о характере и интенсивности намагничивания используемого ферромагнетика.

13. По окончании работы замкните ключ K_3 , ключи K_1 и K_2 разомкните. Удалите вилки шнуров питания из розеток «+12 В» и «220 В».

Контрольные вопросы

1. Что такое намагничивание магнетика?
2. Чем отличаются диа-, пара- и ферромагнитные вещества и какое различие в характере их поведения в однородном магнитном поле?
3. Используя полученную кривую намагничивания, объясните смысл физических процессов, происходящих в ферромагнетике в меняющемся магнитном поле.
4. Что такое и как меняются магнитная проницаемость и магнитная восприимчивость ферромагнетика в ходе его намагничивания?
5. Выведите основные расчётные формулы.
6. Орбитальный магнитный момент электрона в атоме. Гиромагнитное отношение для электрона. Магнитный момент атома.

7. Поведение атома во внешнем магнитном поле. Прецессия электронных орбит. Частота прецессии.
8. Диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики и механизм их намагничивания во внешнем магнитном поле.

Лабораторная работа 9

СНЯТИЕ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ И ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА С ПОМОЩЬЮ ОСЦИЛЛОГРАФА

Цель работы: получить семейство петель гистерезиса и максимальную петлю на экране осциллографа, вычислить и построить графики зависимостей $B = f(H)$, $\mu = f(H)$.

Приборы и принадлежности: тороид с обмотками, осциллограф, автотрансформатор (ЛАТР), сопротивления, конденсаторы, диодная мостовая схема, вольтметр, ключи.

Методические указания и описание установки

На рисунке 1 изображены схема подключения элементов установки для наблюдения петли гистерезиса на экране осциллографа (а) и мостовая диодная схема (б) для измерения напряжений.

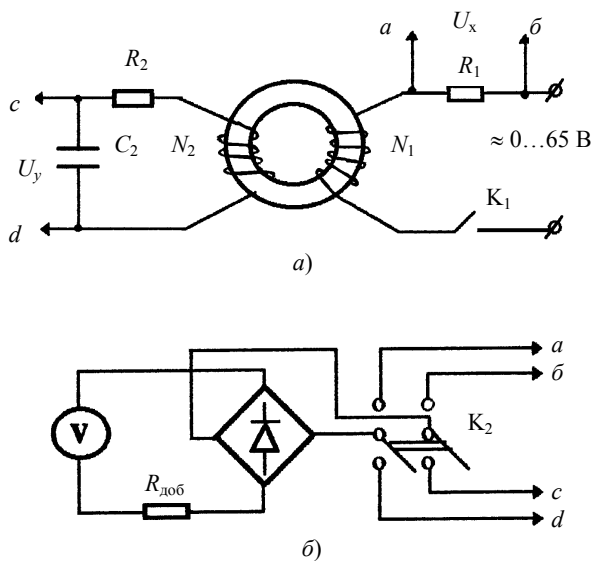


Рис. 1. Электрическая схема установки

Ферромагнитный образец представляет собой тороид. Намагничивающая обмотка N_1 питается переменным током от лабораторного трансформатора (ЛАТР), включаемого в сеть. Чтобы получить на экране осциллографа петлю гистерезиса, нужно на горизонтально отклоняющие пластины X подать напряжение U_x , пропорциональное напряжённости магнитного поля H в образце, а на вертикально отклоняющие пластины Y напряжение U_y , пропорциональное магнитной индукции B .

Величина напряжённости магнитного поля внутри тороида определяется по формуле

$$H = \frac{N_1}{l} i_1, \quad (1)$$

где i_1 – сила тока в первичной обмотке, число витков которой равно N_1 ; l – длина тороида по средней линии.

Напряжение, подаваемое с резистора R_1 , на горизонтальные пластины осциллографа, равно

$$U_x = i_1 R_1 = \frac{R_1 l}{N_1} H. \quad (2)$$

Таким образом, $U_x \sim H$.

Во вторичной обмотке тороида N_2 возникает ЭДС индукции:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\psi}{dt} = -\frac{d(BSN_2)}{dt} = -SN_2 \frac{dB}{dt}, \quad (3)$$

где S – площадь сечения тороида; N_2 – количество витков во вторичной обмотке; ψ – поток магнитной индукции через поверхность, охватываемую всеми витками вторичной катушки.

Для того чтобы получить напряжение U_y , пропорциональное индукции магнитного поля, между индикаторной катушкой (N_2) и осциллографом ставят интегрирующую ячейку RC , удовлетворяющую условию $RC > T$ или $R > 1/(\nu C)$ (T и ν – соответствующий период и частота переменного тока).

Пренебрегая самоиндукцией, запишем закон Ома для вторичной цепи:

$$\varepsilon_i = U_c + i_2 R_2, \quad (4)$$

$$U_c = U_y = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int_0^t i_2 dt. \quad (5)$$

Здесь U_c – напряжение на обкладках конденсатора; C – ёмкость; q – заряд конденсатора; i_2 – мгновенное значение тока зарядки конденсатора C_2 .

Если R_2 велико, то первым членом в формуле (4) можно пренебречь.

Тогда

$$i_2 = \frac{\varepsilon_i}{R_2} = -\frac{SN_2}{R_2} \frac{dB}{dt}. \quad (6)$$

Из выражений (5) и (6) следует, что

$$U_y = -\frac{SN_2}{R_2C} \int_0^B \frac{dB}{dt} dt - \frac{SN_2}{R_2C} \int_0^B dB = -\frac{SN_2}{R_2C} B,$$

т.е.
$$U_y = -\frac{SN_2}{R_2C_2} B, \quad (7)$$

которое пропорционально индукции магнитного поля тороида ($U_y \sim B$).

Таким образом, подавая на одни пластины осциллографа напряжение, пропорциональное H , а на другие – пропорциональное B , получаем на экране осциллографа петлю гистерезиса $B = f(H)$ (рис. 2).

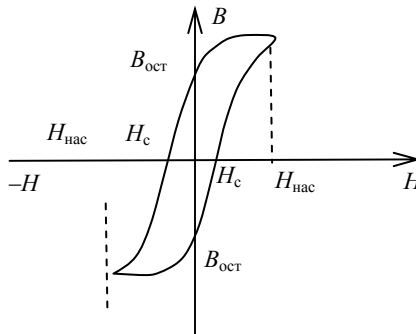


Рис. 2. Зависимость индукции от намагничивающего поля

За период синусоидального изменения тока в первичной обмотке след электронного луча на экране полностью опишет петлю гистерезиса, а за каждый последующий период в точности её повторит. Поэтому на экране будет видна неподвижная петля гистерезиса.

Увеличивая или уменьшая напряжение U_x , а следовательно, меняя амплитуду колебаний напряжённости магнитного поля H , на экране осциллографа будем иметь ряд различных по своей площади петель гистерезиса. Если вершины всех петель, начиная с $U_x = 0$, $U_y = 0$ и до их максимальных значений, соединить одной линией, получим осциллографическую кривую намагничивания магнетика.

Для графического построения начальной кривой намагничивания ферромагнетика необходимо на экране получить семейство петель гистерезиса и

замерить для каждой из них величину напряжений U_x и U_y . Соответствующие значения напряжённости H и индукции B определить из соотношений:

$$H = \frac{N_1}{lR_1} U_x, \quad (8)$$

$$B = \frac{R_2 C}{N_2 S} U_y. \quad (9)$$

Порядок выполнения работы и и обработка результатов измерений

1. Ознакомьтесь с устройством установки, способом измерения напряжений U_x , U_y ; устройством и принципом работы электронного осциллографа.

2. Подсоедините осциллограф и ЛАТР к розеткам «220 В». Включите осциллограф и дайте ему прогреться в течение 2...3 мин.

3. Замкните ключ K_1 и с помощью ЛАТР подайте на первичную обмотку тороида переменное напряжение $\sim 30...35$ В. Ручками управления электронным лучом настройте на экране осциллографа петлю гистерезиса (рис. 2).

4. Определите диапазон напряжений по вольтметру ЛАТР от минимальной (точечной) до максимальной петли гистерезиса, когда хорошо виден участок насыщения намагничивания.

5. Разбейте найденный диапазон напряжений на 8 – 10 точек. Поставьте первое значение напряжения таким, чтобы площадь петли была близкой к минимальной. Переключением ключа K_2 замерьте вольтметром установки выходные напряжения U_x , U_y (рис. 1). Их величины отметьте в таблице, а начальную петлю гистерезиса с экрана перенесите на кальку, обозначив её цифрой 1.

6. Поставьте следующее значение напряжения на обмотке N_1 тороида, замерьте напряжения U_x и U_y , внеся их в таблицу.

Таблица

№ п/п	U_x , В	U_y , В	H , А/м	B , Тл	μ	ΔH , А/м	ΔB , Тл	$\Delta \mu$
1								
...								
10								

7. Прделайте последующие измерения вплоть до максимальной площади петли гистерезиса. При этом, через раз, рисунок петли нанесите на кальку. Дополните таблицу новыми замерами.

8. По формулам (8) и (9) рассчитайте величины H и B для каждого из измеренных U_x и U_y , используя приведённые на установке значения R_1, l, R_2, N_1, N_2, C и S . Расчёты занесите в таблицу.

9. По вычисленным величинам постройте график зависимости $B = f_1(H)$.

10. Исходя из формулы $\mu = B/\mu_0 H$, рассчитайте магнитную проницаемость μ для всех значений U_x и U_y . Внесите в таблицу. По полученным данным постройте графическую зависимость $\mu = f_2(H)$, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

11. Рассчитайте абсолютные погрешности $\Delta H, \Delta B, \Delta \mu$.

12. Проанализируйте полученные петли гистерезиса и графики и сделайте выводы о намагничивании используемого в работе ферромагнетика.

Контрольные вопросы

1. Объясните природу магнетизма вещества.
2. В чём заключаются различия между диа-, пара- и ферромагнетиками в отсутствие внешнего магнитного поля?
3. Поясните явление прецессии орбиты электрона в атоме, находящегося в магнитном поле, и её роль в наведении дополнительного магнитного момента электрона.
4. В чём различие в намагничивании во внешнем магнитном поле диа-, пара- и ферромагнетиков?
5. Поясните явление втягивания и выталкивания магнетика в неоднородном магнитном поле.
6. Объясните явление намагничивания ферромагнетика.
7. Что такое петля гистерезиса и почему она возникает?
8. Покажите, что измеряемые в работе значения напряжений U_x и U_y пропорциональны соответственно напряжённости и индукции магнитного поля тороида.
9. Нарисуйте типичную для магнитомягких ферромагнетиков петлю гистерезиса и объясните физический смысл величин $B_{ост}$ и H_c .
10. Что такое магнитная проницаемость и магнитная восприимчивость, их физический смысл?
11. Магнитомягкие и магнитотвёрдые ферромагнетики и их применение.

ИЗУЧЕНИЕ СОБСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ В КОНТУРЕ

Цель работы: изучение влияния параметров колебательного контура на характер электромагнитных колебаний, возникающих в нём, а также приобретение навыков анализа обработки графической информации.

Приборы и принадлежности: электронный генератор кратковременных прямоугольных импульсов; периодически заряжающий конденсатор контура; система различных по ёмкости конденсаторов; батарея из последовательно соединённых катушек индуктивности; набор резисторов; электронный осциллограф; мостик Уитстона (мост постоянного тока типа ММВ); переключатели; ключи.

Методические указания и описание установки

В электрическом колебательном контуре происходят периодические изменения ряда физических величин (тока, напряжения, заряда и др.). Реальный колебательный контур в упрощённом виде состоит из последовательно соединённых конденсатора C , катушки индуктивности L и активного сопротивления R (рис. 1).

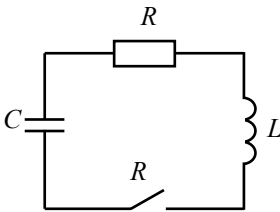


Рис. 1. Схема контура

Если конденсатор зарядить, а затем замкнуть ключ K , он начнёт разряжаться, и в контуре появляется нарастающий ток и пропорциональное ему магнитное поле. Нарастание магнитного поля приводит к возникновению в контуре ЭДС самоиндукции:

$$\varepsilon_{Si} = -L \frac{dI}{dt}. \quad (1)$$

В результате этого (обратите внимание на знак «минус») скорость разряда конденсатора замедляется. После того, как конденсатор полностью разрядится, ЭДС индукции начинает поддерживать ток в прежнем направлении. В итоге происходит перезаряд конденсатора, т.е. первоначально положительно заряженная пластина конденсатора становится отрицательно заряженной и наоборот. Затем процесс разряда начнётся снова, но в обратном направлении. В цепи возникают повторяющиеся с определённым периодом электромагнитные колебания.

Колебания в электрическом контуре сопоставимы с механическими колебаниями, например, груза на пружине.

Во время колебательного процесса происходит переход энергии из одной формы в другую. При колебаниях груза потенциальная энергия

растянутой (или сжатой) пружины переходит в кинетическую энергию движущегося груза. В случае электромагнитных колебаний в контуре при разряде конденсатора его электрическая энергия переходит в энергию магнитного поля тока в катушке. В реальных случаях часть энергии расходуется на так называемые диссипативные процессы. Так, при колебаниях груза амплитуда уменьшается со временем вследствие трения, излучения, т.е. отдачи энергии во внешнюю среду, которую возмущает колеблющийся груз, и других явлений. Амплитуда электромагнитных колебаний также уменьшается вследствие потерь энергии из-за нагрева активного сопротивления, которое всегда присутствует (катушка имеет омическое сопротивление), и излучения электромагнитных волн, так как контур не является идеально закрытым. При небольших частотах колебаний последним фактором можно пренебречь. В результате электромагнитные колебания, так же как и механические, будут затухающими.

Для нахождения уравнения, описывающего характер электромагнитных колебаний в реальном колебательном контуре, можно воспользоваться законом изменения энергии контура во времени:

$$d\left(\frac{q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2}\right) = -d(I^2Rt) = -I^2Rdt, \quad (2)$$

где $q^2/2C$ – энергия электрического поля в конденсаторе; $LI^2/2$ – энергия магнитного поля в катушке индуктивности; I^2Rdt – тепловая энергия, выделяющаяся в активном сопротивлении контура за время dt .

Учитывая, что $I = \frac{dq}{dt}$, из уравнения (2) получаем дифференциальное уравнение свободных затухающих колебаний:

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dq}{dt} + \frac{1}{LC} q = 0$$

или, введя обозначения $1/LC = \omega_0^2$, – квадрат собственной циклической частоты колебаний в контуре, $R/2L = \beta$ – коэффициент затухания, получим окончательно уравнение в виде

$$\ddot{q} + 2\beta\dot{q} + \omega_0^2 q = 0, \quad (3)$$

которое при условии $\beta^2 < \omega_0^2$ имеет следующее решение:

$$q = q_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (4)$$

где $q_0 e^{-\beta t} = q(t)$ – амплитуда колебаний заряда конденсатора в момент времени t , q_0 – значение заряда при $t = 0$; φ_0 – начальная фаза колебаний. Циклическая частота затухающих колебаний $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$, отличающаяся от частоты собственных колебаний ω_0 , определяет *условный период* этих колебаний:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi / \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}, \quad (5)$$

где R , L и C – соответственно активное сопротивление контура, индуктивность катушки и ёмкость конденсатора.

Затухание колебаний характеризуется величиной, называемой *логарифмическим декрементом затухания*:

$$\delta = \ln \frac{q(t)}{q(t+T)} = \beta T, \quad (6)$$

или с учётом выражений для β и T

$$\delta = \pi R / \left(L \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \right) = \pi R / \sqrt{\frac{L}{C} - \frac{R^2}{4}}. \quad (7)$$

В технике качество колебательной системы характеризуется так называемой добротностью θ контура. Добротностью называют физическую величину, равную произведению числа π на количество полных колебаний N , в течение которых амплитуда уменьшается в e раз. Из условия $q_0 e^{-\beta t} / q_0 e^{-\beta(t+NT)} = e$ находим $N = 1/\beta T$. Тогда

$$\theta = \frac{\pi}{\beta T} = \frac{\pi}{\delta} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C} - \frac{R^2}{4}}. \quad (8)$$

В случае, когда $\beta^2 \geq \omega_0^2$, т.е. $\frac{R^2}{4L^2} \geq \frac{1}{LC}$, выражение для периода колебаний $T = 2\pi / \sqrt{1/LC - R^2/4L^2}$ теряет смысл и периодический процесс в контуре переходит в аperiodический, при этом сопротивление контура

$$R_{кр} = 2\sqrt{\frac{L}{C}} \quad (9)$$

называется *критическим*.

Характер изменения заряда (напряжения) на обкладках конденсатора или тока в катушке индуктивности при затухающих колебаниях и апериодическом разряде изображён на рис. 2, а, б.

Исследование свободных затухающих колебаний проводится на установке, блок-схема которой показана на рис. 3, а. Здесь ГИ – генератор кратковременных импульсов, RCL – колебательный контур, состоящий из параллельно соединённых L и C , МУ – мостик Уитстона (типа ММВ), ЭО – электронный осциллограф.

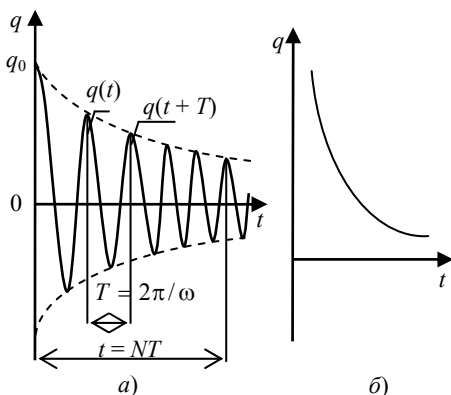


Рис. 2. Графики колебаний

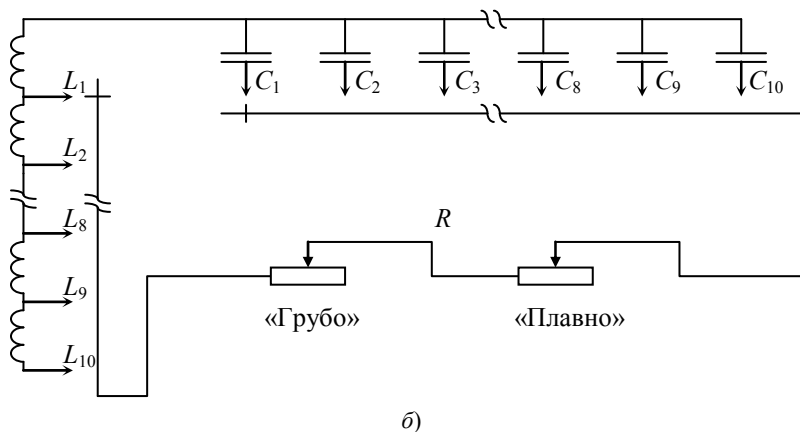
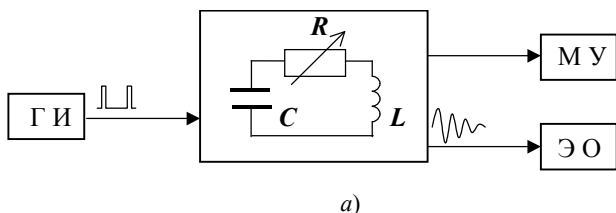


Рис. 3. Электрическая схема установки

Развёрнутая схема колебательного контура дана на рис. 3, б. Варьирование параметрами контура (ёмкостью, индуктивностью и омическим сопротивлением) на установке осуществляется следующим образом: ёмкостью – посредством переключателя «С» в контур вводится один из набора конденсаторов $C_1 - C_{10}$; индуктивность изменяется переключателем «L» путём последовательного подключения к катушке L_1 аналогичных, соединённых между собой катушек в блоке $L_2 - L_{10}$. Например: индуктивность $L_1 = L$, а $L_4 = L + L + L + L = 4L$, $L_6 = 6L$. Активное сопротивление подбирается с помощью переключателей «R» посредством ступенчатого подключения последовательно соединённых резисторов («грубо») и последовательно соединённого с ними переменного резистора («плавно»). Значения ёмкостей и индуктивностей указаны на установке. Величина полного омического сопротивления контура, включая сопротивление обмоток соответствующих катушек индуктивностей, измеряется встроенным в установку стандартным мостиком Уитстона (МУ).

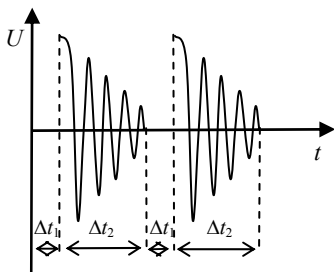


Рис. 4. Импульсы разряда на конденсаторе

Заряд конденсатора C_1 осуществляется кратковременными (Δt_1) импульсами напряжения с большими промежутками между ними, выдаваемыми генератором импульсов ГИ. В промежутках Δt_2 ($\Delta t_2 \gg \Delta t_1$) происходят затухающие колебания в контуре (рис. 4; 2, а), наблюдаемые на экране осциллографа, подключённого к омическому сопротивлению R .

Амплитуда напряжения на обкладках конденсатора меняется по закону

$$U = U_0 e^{-\beta t},$$

где U_0 – величина амплитудного напряжения в момент времени $t = 0$.

Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

Внимание! Перед выполнением работы необходимо ознакомиться с устройством колебательного контура установки и схемой подсоединения его элементов, а также с принципами работы электронного осциллографа и мостика Уитстона.

Задание 1. Исследование зависимости периода колебаний от параметров колебательного контура: ёмкости C , индуктивности L , сопротивления R .

Экспериментально период определяется по картине, получаемой на экране электронного осциллографа. Зная цену деления по времени, можно измерить время либо единичного колебания, либо N колебаний. В этом случае период будет равен $T = t/N$ (см. рис. 2, а). Для этого:

1. Подключите сетевой шнур осциллографа, блока питания генератора импульсов (ГИ) и мостика Уитстона (МУ) в сеть 220 В. Нажмите кнопку «POWER» осциллографа и убедитесь, что загорелся индикатор включения сети, замкните ключ K_1 и дайте прогреться элементам установки в течение 2...3 мин. Ключ K_2 блока колебательного контура должен находиться в положении «на себя» (исходное положение).

2. С помощью переключателей установите любое сочетание величин ёмкостей и индуктивностей (C_i, L_i). Внешнее сопротивление контура выведите на нуль ($R = 0$) вращением против часовой стрелки до упора переключателей R «грубо» и «плавно». В контуре останется лишь активное сопротивление подключённой части катушек индуктивности и соединительных проводов.

3. Для получения устойчивой картины затухающих колебаний на экране осциллографа проделайте следующие операции:

а) переключатель режима работы усилителя осциллографа «MODE» установите в положение «CH 1». При этом разъём шнура, подающего сигнал от колебательного контура, должен быть подключён к каналу X (разъём «CH 1») осциллографа, а переключатель режима работы данного канала находится в положении «DC». С помощью переключателя «VOLTS/DIV» (вольт/дел), позволяющего дискретно изменять коэффициент отклонения луча по вертикали (ось Y), установите необходимое усиление сигнала по оси Y для канала «CH 1». Например, если переключатель стоит в положении «2», то одному делению (1 см) координатной сетки экрана по оси Y соответствует величина сигнала, равная 2 В, при этом ручка плавной регулировки коэффициентов усиления «VARIABLE» должна быть установлена в положении «CAL» (калибровка);

б) переключателями и ручками (расположены на правой половине передней панели осциллографа) установите необходимые для данного сигнала режимы синхронизации и развёртки по горизонтали экрана (ось X). Для этого:

– переключатель «MODE» установите в положение «AUTO» или «NORM», а переключатель «TRIGGER SOURCE» в положение «CH 1»;

– установите переключатели, регулирующие растяжку и калибровку времени развёртки исследуемого сигнала по оси X , в положение «X 1» и «CAL», соответственно, т.е. эти кнопки должны быть не нажаты.

С помощью ручки переключателя «TIME/DIV» (время/дел) установите такое время развёртки, при котором на экране отображается необходимое число периодов сигнала. Если периодов много, то уменьшите время развёртки. Например, если переключатель «время/дел» установлен в положение « $mS .1$ », то цена деления (1 см по горизонтали) равна 0,1 миллисекунды;

в) ручками «INTEN», «FOCUS» и «POSITION» отрегулируйте яркость и резкость наблюдаемой осциллограммы сигнала и её расположение относительно центра экрана.

4. Зная цену деления временной развёртки сигнала по оси X (п. 3, б), замерьте период ($T_{\text{экс}}$) одного полного колебания или время N полных колебаний для данного сочетания значений L и C и разделите это время на число колебаний. Замеренные значения занесите в табл. 1, а полученную осциллограмму сигнала перенесите на кальку.

5. Мостиком Уитстона замерьте величину активного сопротивления включённых катушек индуктивности. Для этого ключ K_2 переведите в положение «Вкл. МУ» и одновременным нажатием кнопки и вращением ручки реохорда мостика добейтесь установления стрелки на нуль. По схеме, приведённой на приборе, произведите отсчёт сопротивления и запишите его в табл. 1. Особенность установки: при переключении K_2 колебательный контур отключается от осциллографа, и кривая затухающих колебаний исчезает с экрана. После замера сопротивления ключ K_2 верните в исходное положение.

6. Поочерёдно меняя L_i и C_i , замерьте для каждого из сочетаний период колебаний ($T_{\text{экс}}$). Мостиком Уитстона замерьте сопротивление контура R_i . Данные занесите в табл. 1, а кривые переведите с экрана на кальку.

7. По формуле (5) рассчитайте теоретические значения периодов ($T_{\text{теор}}$) для всех сочетаний L и C и сравните их с экспериментально замеренными ($T_{\text{экс}}$). Сделайте выводы о влиянии каждого из параметров на период затухающих колебаний.

Таблица 1

№ п/п	L_i , мГн	C_i , нФ	R_{L_i} , Ом	N	$t \times 10^{-5}$, с	$T_{\text{экс}} \times 10^{-5}$, с	$T_{\text{теор}} \times 10^{-5}$, с	E_T , %
1								
2								
3								
4								

8. Определите погрешности в оценке периодов $E_T = \left| \frac{T_{\text{теор}} - T_{\text{экс}}}{T_{\text{теор}}} \right|$ данным методом и сделайте выводы о качестве согласования опытных и теоретических значений периодов колебаний в рассматриваемых вариантах.

Задание 2. Определение логарифмического декремента затухания и добротности колебательного контура.

1. Перенесите значения L_i , C_i и R_i из табл. 1 в табл. 2.

2. На полученных в первом задании осциллограммах измерьте амплитуды колебаний, полученные результаты внесите в табл. 2.

3. Сравните полученные осциллограммы колебаний и сделайте выводы о влиянии R , L и C на амплитуду свободных затухающих колебаний.

Таблица 2

№ п/п	L_i , мГн	C_i , нФ	R_i , Ом	$A_t^{\text{эксп}}$	$A_{(t+NT)}^{\text{эксп}}$	$\delta_{\text{эксп}}$	$\delta_{\text{теор}}$	$\theta_{\text{эксп}}$	$\theta_{\text{теор}}$	E_{δ} , %	E_{θ} , %
1											
...											
4											

4. По полученным значениям амплитуд A_m и A_{m+N} (для соседних колебаний $N = 1$) для разных сочетаний L , C и R определите логарифмические декременты затухания ($\delta_{\text{эксп}}$) и добротности контуров ($\theta_{\text{эксп}}$):

$$\delta_{\text{эксп}} = \frac{1}{n} \ln \frac{A_m}{A_{m+N}}; \quad \theta_{\text{эксп}} = \pi / \delta_{\text{эксп}} .$$

5. По формулам (7) и (8) рассчитайте теоретические значения логарифмических декрементов затухания ($\delta_{\text{теор}}$) и добротности контуров ($\theta_{\text{теор}}$) для тех же сочетаний величин L , C и R . Полученные опытные и теоретические значения занесите в табл. 2.

6. Оцените погрешности $\frac{|\delta_{\text{теор}} - \delta_{\text{эксп}}|}{\delta_{\text{теор}}}$ и $\frac{|\theta_{\text{теор}} - \theta_{\text{эксп}}|}{\theta_{\text{теор}}}$, с которыми

в данной работе определяются логарифмические декременты затухания и добротности контуров и сделайте выводы о качестве согласования опытных и теоретических значений исследуемых величин.

Задание 3. Определение критического сопротивления колебательного контура при заданных величинах ёмкости и индуктивности.

1. Установите первоначальное значение индуктивности L_i и любую из величин C , за исключением $C_1 - C_4$ (при этих ёмкостях на данной установке нельзя достигнуть аperiодического разряда). Постепенно увеличивая сопротивление R , сначала переключателем «грубо», а затем «плавно» переведите колебательный процесс разряда конденсатора в аperiодический (рис. 2, б). Такой характер аperiодического разряда обусловлен наличием в схеме генератора импульсов электронного ключа, который практически мгновенно отключает контур после выдачи импульса, заряжающего конденсатор. Для большей точности определения момента перехода к аperiодическому разряду, заключительную стадию увеличения сопротивления производите с помощью рукоятки «плавно».

2. Мостиком Уитстона замерьте полученное сопротивление, которое и будет критическим ($R_{\text{кр}}^{\text{эксп}}$) для выбранных значений L и C контура.

3. По формуле (9) рассчитайте теоретическое значение критического сопротивления $(R_{кр}^{теор})$ для использованных величин C и L и внесите его в табл. 3. Сравните опытно полученные значения с теоретическими.

Таблица 3

L , мГн	C , нФ	$R_{кр}^{эксп}$, Ом	$R_{кр}^{теор}$, Ом	$E_{R_{кр}}$, %

5. Рассчитайте погрешности $E_R = \frac{|R_{кртеор} - R_{крэксп}|}{R_{кртеор}}$ в оценке критических сопротивлений, проанализируйте полученные результаты и сделайте выводы.

Контрольные вопросы

1. Вывести дифференциальное уравнение, описывающее затухающие электромагнитные колебания в контуре.
2. Что такое период колебаний, логарифмический декремент затухания и добротность контура, их физический смысл? Получить теоретическое соотношение для каждого из них.
3. Что такое апериодический разряд конденсатора, критическое сопротивление, его связь с параметрами контура?
4. Нарисуйте схему используемого в установке колебательного контура и объясните процесс электромагнитных колебаний в нём.
5. Как экспериментально определяются период колебаний, логарифмический декремент затухания, добротность контура и критическое сопротивление?
6. Объясните влияние ёмкости, индуктивности и активного сопротивления контура на характер затухающих колебаний в нём.
7. Приведите примеры использования колебательного контура.
8. Составьте дифференциальные уравнения, описывающие свободные незатухающие колебания заряда, тока и напряжения в контуре, запишите решения этих уравнений.
9. Получите выражения, описывающие изменения энергии электрического и магнитного полей в контуре при свободных незатухающих колебаниях.
10. Как соотносятся фазы колебаний тока, напряжения и заряда в колебательном контуре?

ИЗУЧЕНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ

Цель работы: исследование зависимости силы тока в цепи из последовательно соединённых резистора, конденсатора и индуктивности, а также напряжения на этих элементах от частоты ЭДС, действующей в цепи; выяснение условий электрического резонанса в цепи переменного тока; вычисление добротности и волнового сопротивления контура.

Приборы и принадлежности: генератор звуковой частоты (с выходным напряжением не мене 5 В); конденсатор бумажный (0,5 мкФ); катушка индуктивности (от разборного трансформатора на 220 В); резистор (100 Ом); миллиамперметр; вольтметры; ключи; соединительные провода.

Методические указания и описание установки

В электрической цепи (рис. 1) из последовательно соединённых резистора R , конденсатора C и катушки индуктивности L под действием внешней переменной ЭДС, изменяющейся со временем по гармоническому закону $\varepsilon = \varepsilon_{\max} \cos \Omega t$, возникают вынужденные гармонические колебания заряда, силы тока и напряжения на отдельных её участках.

При постоянной амплитуде колебаний внешней ЭДС – ε_{\max} амплитуда колебаний заряда, силы тока и напряжения в цепи зависит от частоты Ω этой внешней вынуждающей электродвижущей силы.

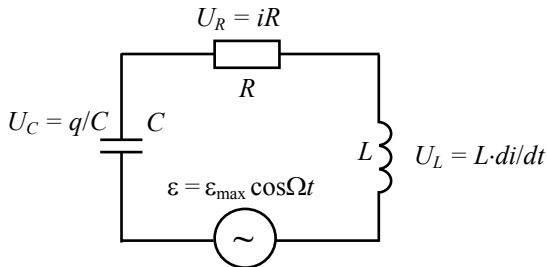


Рис. 1. Схема последовательного колебательного контура

Проиллюстрируем эту зависимость с помощью дифференциального уравнения вынужденных колебаний. Для его получения воспользуемся законом сохранения энергии, учитывая, что тепло в контуре выделяется не только за счёт убыли энергии электрического и магнитного полей, но и за счёт работы внешней ЭДС – ε

$$i^2 R dt = -d \left(\frac{Li^2}{2} + \frac{q^2}{2C} \right) + i \varepsilon dt.$$

Обозначив $i = q'$, $i' = q''$, $R/L = 2\beta$, $1/LC = \omega_0^2$, где q – заряд на пластинах конденсатора, i – ток в цепи, β – коэффициент затухания, ω_0 – циклическая частота, получим дифференциальное уравнение вида

$$q'' + 2\beta q' + \omega_0^2 q = \frac{\varepsilon_{\max}}{L} \cos \Omega t. \quad (1)$$

При установившихся вынужденных колебаниях в цепи частное решение этого уравнения будет иметь вид

$$q = q_{\max} \cos(\Omega t + \varphi_0), \quad (2)$$

где амплитуда заряда и начальная фаза колебаний находятся по формулам:

$$q_{\max} = \frac{\varepsilon_{\max}}{L\sqrt{(\omega_0^2 - \Omega^2)^2 + 4\beta^2\Omega^2}}; \quad \operatorname{tg}\varphi_0 = -\frac{2\beta\Omega}{\omega_0^2 - \Omega^2}. \quad (3)$$

Учитывая, что $1/LC = \omega_0^2$, $R/L = 2\beta$, выражения (3) можно записать как

$$q_{\max} = \frac{\varepsilon_{\max}}{\Omega\sqrt{\left(\frac{1}{\Omega C} - \Omega L\right)^2 + R^2}}; \quad \operatorname{tg}\varphi_0 = \frac{R}{\Omega L - \frac{1}{\Omega C}}. \quad (4)$$

Из (3) следует, что при $\Omega = 0$ фаза колебаний $\varphi_0(0) = 0$, а заряд

$$q_0 = \frac{\varepsilon_{\max}}{\omega_0^2 L} = \varepsilon_{\max} C,$$

т.е. равен заряду конденсатора при постоянной разности потенциалов на его обкладках, равной ε_{\max} . При $\Omega \rightarrow \infty$ амплитудное значение заряда $q_{\max} \rightarrow 0$, а $\varphi_0 \rightarrow -\pi$.

Графики зависимости $q_{\max}(\Omega)$ и $\varphi_0(\Omega)$ показаны на рис. 2, 3.

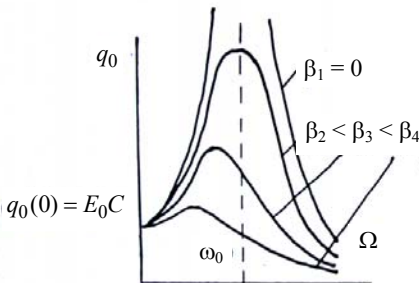


Рис. 2. Графики зависимости $q_{\max}(\Omega)$

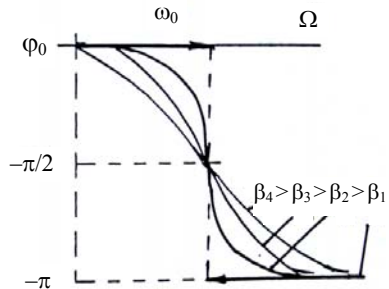


Рис. 3. Графики зависимости $\varphi_0(\Omega)$

Сила тока при установившихся вынужденных колебаниях в контуре находится из (2)

$$i = \frac{dq}{dt} = -\Omega q_{\max} \sin(\Omega t + \varphi_0) = I_{\max} \cos(\Omega t - \varphi). \quad (5)$$

Тогда с учётом (4) имеем, что амплитуда тока и начальная фаза $-\varphi = \varphi_0 + \pi/2$ определяются как

$$I_{\max} = q_{\max} \Omega = \frac{\varepsilon_{\max}}{\sqrt{\left(\frac{1}{\Omega C} - \Omega L\right)^2 + R^2}}; \quad \operatorname{tg} \varphi = \operatorname{ctg} \varphi_0 = \frac{\Omega L - 1/\Omega C}{R}. \quad (6)$$

Графики зависимости $I_{\max}(\Omega)$ при различных R называются резонансными кривыми колебательного контура (рис. 4). Из графиков видно, что резонансная циклическая частота $\Omega_{\text{рез}}$, соответствующая максимуму амплитуды тока в контуре при вынужденных колебаниях, не зависит от R

$$\Omega_{\text{рез}} = \omega_0 = 1/\sqrt{LC}. \quad (7)$$

Графики зависимости $\varphi(\Omega)$ показаны на рис. 5. Из формул (6) и графиков (см. рис. 4 и рис. 5) видно, что сила тока при резонансе $I_{\max \Omega_{\text{рез}}} = \frac{\varepsilon_{\max}}{R}$, а сдвиг фаз между силой тока и ЭДС $-\varphi(\Omega_{\text{рез}}) = 0$.

Если же $\Omega < \omega_0$, то $\varphi < 0$, т.е. сила тока опережает ЭДС по фазе и тем сильнее, чем меньше Ω ($\varphi = -\pi/2$ при $\Omega = 0$).

Если $\Omega > \omega_0$, то $\varphi > 0$, т.е. сила тока отстаёт по фазе от ЭДС и тем сильнее, чем больше Ω ($\varphi \rightarrow \pi/2$ при $\Omega \rightarrow \infty$).

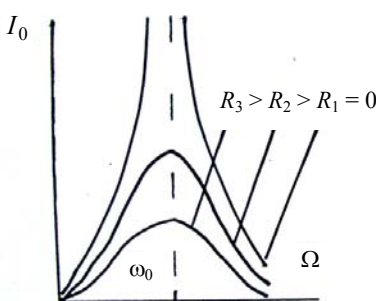


Рис. 4. Резонансные кривые

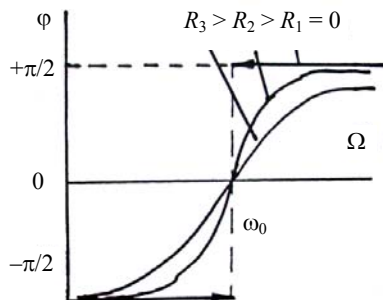


Рис. 5. Сдвиг фаз тока и ЭДС

Падение напряжения на отдельных участках электрической цепи (последовательного колебательного контура) можно определить по формулам (2) и (5):

– на резисторе

$$U_R = IR = I_{\max} R \cos(\Omega t - \varphi) = U_{\max R} \cos(\Omega t - \varphi);$$

– на конденсаторе

$$U_C = q/C = (q_{\max}/C) \cos(\Omega t - \varphi - \pi/2) = U_{\max C} \cos(\Omega t - \varphi - \pi/2); \quad (8)$$

– на индуктивности

$$U_L = L di/dt = LI_{\max} \cos(\Omega t - \varphi + \pi/2) = U_{\max L} \cos(\Omega t - \varphi + \pi/2).$$

Из (8) видно, что колебания напряжения U_R на резисторе происходят в одной фазе с колебаниями тока в цепи; U_C – отстаёт от него на $\pi/2$, а U_L – опережает ток по фазе на $\pi/2$, причём по закону Ома для замкнутой цепи (рис. 1) выполняется равенство

$$U_R + U_C + U_L = \varepsilon_{\max} \cos \Omega t. \quad (9)$$

Амплитудные значения U_R , U_C и U_L можно представить как

$$U_{\max R} = I_{\max} R; \quad U_{\max C} = I_{\max} X_C; \quad U_{\max L} = I_{\max} X_L, \quad (10)$$

где $X_C = 1/\Omega C$ – ёмкостное сопротивление; $X_L = \Omega L$ – индуктивное сопротивление, а R – активное электрическое сопротивление.

Величины $X = X_L - X_C = \Omega L - 1/\Omega C$ и

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + (\Omega L - 1/\Omega C)^2} \quad (11)$$

называются соответственно *реактивным* и *полным сопротивлениями* цепи.

При резонансе индуктивное сопротивление X_L катушки и равное ему ёмкостное сопротивление X_C конденсатора называются *волновым сопротивлением* ρ последовательного контура:

$$\rho = \omega_0 L = 1/\omega_0 C = \sqrt{L/C}. \quad (12)$$

В этом случае реактивное сопротивление $X = X_L - X_C$ обращается в нуль, а полное сопротивление цепи достигает минимального значения, равного её активному сопротивлению R :

$$X(\Omega_{\text{рез}}) = 0; \quad Z(\Omega_{\text{рез}}) = Z_{\min} = R.$$

Графические зависимости реактивного (ёмкостного и индуктивного) сопротивления от частоты Ω приведены на рис. 6. При резонансе величина тока достигает максимального значения $I_{\text{рез}} = \varepsilon_{\max}/R$.

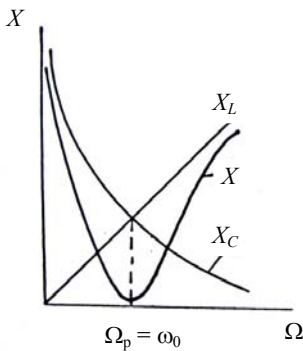


Рис. 6. Графики зависимостей X_L , X_C , X от частоты Ω

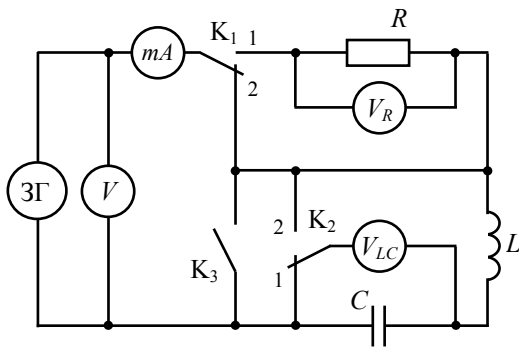


Рис. 7. Схема установки

Напряжение всей цепи

$$U = U_R = I_{\text{рез}} Z_{\text{min}} = I_{\text{рез}} R = \varepsilon_{\text{max}} .$$

Напряжение на конденсаторе (индуктивности) при резонансе равно

$$U_{C_{\text{рез}}} = U_{L_{\text{рез}}} = I_{\text{рез}} \rho = \frac{U}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} .$$

Отношение напряжения $U_{C_{\text{рез}}}$ на конденсаторе ($U_{L_{\text{рез}}}$ на индуктивности) к общему напряжению $U = \varepsilon_{\text{max}}$ при резонансе называется *добротностью контура* Q

$$Q = U_{C_{\text{рез}}} / \varepsilon_{\text{max}} = \rho / R = \sqrt{L/C} \frac{1}{R} . \quad (13)$$

Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

1. Соберите (изучите) электрическую цепь в соответствии с рабочей схемой (рис. 7).
2. Обратите внимание на назначение и порядок работы ключей $K_1 - K_3$.
3. Изменяйте частоту Ω подаваемого в цепь напряжения (со звукового генератора) от 100 до 2000 Гц ступенями по 100 Гц. При каждом значении частоты Ω_i снимайте показания вольтметров U_R , U_C , U_L , а также миллиамперметра – I_i . Результаты измерений занесите в табл. 1 (при этом ключ K_1 находится в положении 1, ключ K_2 – поочерёдно в положениях 1 и 2, ключ K_3 – разомкнут).

Таблица 1

Частота Ω , Гц		100	200	300	...	1900	2000
Напряжение на резисторе U_R , В							
Напряжение на конденсаторе U_C , В							
Напряжение на индуктивности U_L , В							
Ток в цепи I_i , мА	с резистором						
	без резистора						

4. Постройте графики, изображающие зависимость перечисленных величин от частоты Ω . Обратите внимание на ход кривых при $\Omega \rightarrow 0$ и $\Omega \rightarrow \infty$.

5. По графику определите частоту ω_0 собственных свободных колебаний в контуре.

6. Выключите из электрической цепи резистор R (ключ K_1 в положении 2) и повторите измерения величины тока согласно п. 3 (заполняется последняя строка).

7. Измерьте напряжения $U_{L_{рез}}$ и $U_{C_{рез}}$ на индуктивности и конденсаторе при достижении электрического резонанса и занесите их в табл. 2.

8. Убедитесь, что в момент резонанса контур обладает только активным сопротивлением. Для этого замкните ключ K_3 и наблюдайте, что показания миллиамперметра не изменяются.

9. Постройте второй график зависимости силы тока в цепи от частоты (при $R = 0$).

10. По измеренным значениям напряжения и силы тока при резонансной частоте $\Omega_{рез}$ найдите активное сопротивление R , волновое сопротивление ρ , индуктивность катушки L и добротность Q_T колебательного контура с резистором и без резистора.

11. Измерьте напряжение $U_{C_{рез}}$ на конденсаторе и общее напряжение \mathcal{E} на выходе звукового генератора, найдите их отношение – Q_3 . Сравните это отношение с вычисленным значением добротности контура Q_T .

12. Результаты измерений и вычислений занесите в табл. 2.

Таблица 2

	ε , В	I , А	R , Ом	L , Гн	C , Ф	$\Omega_{рез}$, Гц	ρ , Ом	Q_T	$U_{C_{рез}}$, В	Q_3
С резистором										
Без резистора										

Контрольные вопросы

1. Что такое электрический резонанс и при каких условиях он наступает?
2. Почему амплитуда колебаний силы тока в цепи, состоящей из конденсатора и индуктивности, при постоянной амплитуде колебаний приложенной внешней вынуждающей ЭДС сначала возрастает с увеличением частоты, а затем уменьшается?
3. Почему во время проведения эксперимента необходимо поддерживать постоянным выходное напряжение звукового генератора?
4. Где используется явление электрического резонанса?

Лабораторная работа 12

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИУСА КРИВИЗНЫ ЛИНЗЫ И ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ С ПОМОЩЬЮ КОЛЕЦ НЬЮТОНА

Цель работы: 1) ознакомиться с устройством, принципом работы оптического микроскопа, способом получения и наблюдения колец Ньютона; 2) научиться измерять диаметры колец, определять радиус кривизны линзы, а также среднюю длину волны света, пропускаемого светофильтром.

Приборы и принадлежности: микроскоп с осветителем и блоком питания; линза; стеклянная пластинка; два светофильтра; объект-икрометр.

Методические указания и описание установки

При отражении монохроматического света от тонкой плёнки в результате интерференции могут наблюдаться полосы равной толщины – участки с одинаковой освещённостью, соответствующие одинаковой толщине плёнки. Классическим примером полос равной толщины являются кольца Ньютона. Они наблюдаются при отражении света от соприкасающихся плоскопараллельной пластинки и плосковыпуклой линзы. Роль тонкой плёнки, от поверхности которой отражаются когерентные волны, играет воздушный зазор между пластинкой и линзой.

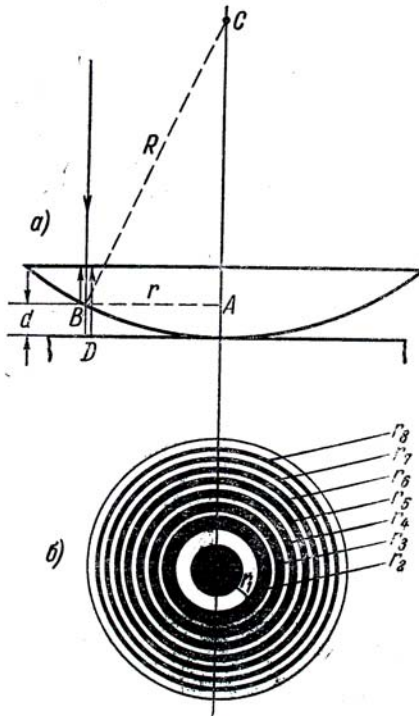


Рис. 1. Ход лучей (а) при образовании колец Ньютона (б)

Пучок параллельных лучей падает сверху на линзу. Луч, доходящий до точки B , частично отражается, частично проходит в воздушный клин. Отражаясь в точке D от пластинки, он возвращается обратно и интерферирует с лучом, отражённым в точке B . Учитывая потерю полволны в точке D , определим оптическую разность хода лучей как

$$\delta = 2d + \frac{\lambda_0}{2} = \frac{r^2}{R} + \frac{\lambda_0}{2}. \quad (2)$$

При освещении системы монохроматическими лучами в отражённом свете будут наблюдаться перемежающиеся светлые и тёмные кольца радиусов r (см. рис. 1, б). Радиусы тёмных колец определяются из условия

гашения $\delta = (2m + 1) \frac{\lambda_0}{2}$, т.е.

$$\frac{r^2}{R} + \frac{\lambda_0}{2} = m\lambda_0 + \frac{\lambda_0}{2},$$

откуда радиус m -го тёмного кольца равен

Интерференционная картина имеет вид чередующихся светлых и тёмных колец, расстояния между которыми убывают по мере удаления от центра (рис. 1, б).

Плосковыпуклая линза большого радиуса кривизны прижимается выпуклой стороной к плоской стеклянной пластинке так, что между ними образуется воздушный клин переменной толщины d . Толщина этого клина зависит от расположения точки B , характеризуемого радиусом r .

Из прямоугольного треугольника ABC (рис. 1, а) имеем

$$r^2 = R^2 - (R - d)^2 = (2R - d)d \approx 2Rd,$$

откуда

$$d \approx \frac{r^2}{2R}. \quad (1)$$

Пучок параллельных лучей падает сверху на линзу. Луч, доходящий до точки B , частично отражается, частично проходит в воздушный клин. Отражаясь в точке D от пластинки, он возвращается обратно и интерферирует с лучом, отражённым в точке B . Учитывая потерю полволны в точке D , определим оптическую разность хода лучей как

$$r_m = \sqrt{m\lambda_0 R} = \sqrt{2m \frac{\lambda_0}{2} R} . \quad (3)$$

Радиусы светлых колец находятся из условия максимумов $\delta = 2m \frac{\lambda_0}{2}$

и равны

$$r_m^* = \sqrt{(2m-1) \frac{\lambda_0}{2} R} . \quad (4)$$

Счёт тёмных колец начинается с $m = 0$, светлых – с $m = 1$. При освещении прибора белым светом светлые кольца становятся соответственно окрашенными.

По формулам (3) и (4) можно определить радиус кривизны линзы R , если известна длина световой волны и номер кольца m .

Но так как вследствие упругой деформации стекла невозможно добиться соприкосновения линзы и пластинки строго в одной точке, то более правильный результат получится, если вычислять R по разности диаметров двух колец, тогда окончательная формула будет иметь следующий вид:

$$R = \frac{d_{m1}^2 - d_{n1}^2}{4(m-n)\lambda_1} , \quad (5)$$

где m и n – номера колец, d_{m1} и d_{n1} – их диаметры, λ_1 – известная длина волны света, пропускаемого первым светофильтром. Поставив второй светофильтр для неизвестной длины волны света λ_2 и измерив радиусы соответствующих колец, можно определить неизвестную длину волны света по формуле

$$\lambda_2 = \lambda_1 \frac{d_{m2}^2 - d_{n2}^2}{d_{m1}^2 - d_{n1}^2} , \quad (6)$$

где d_{m2} и d_{n2} – диаметры колец с теми же номерами, но полученными при измерении со светофильтром для неизвестной длиной волны света λ_2 .

Установка для наблюдения колец Ньютона состоит из микроскопа с осветителем, стеклянной пластинки и линзы в одной обойме, помещённой на предметном столике микроскопа. Микроскоп имеет два окуляра. Один из них снабжён шкалой с делениями для проведения измерений, другой – для более быстрого нахождения наблюдаемых колец. С помощью светофильтра из сплошного спектра лампы накаливания выделяется свет определённого цвета с некоторой средней длиной волны. Предметный столик может перемещаться в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Вертикальное перемещение тубуса микроскопа с объективом (настройка на резкость) производится с помощью винтов грубой и точной настройки.

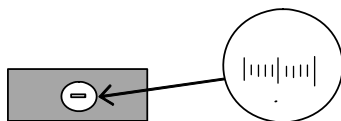


Рис. 2. Объект-микрометр

Некоторая сложность в «поиске» колец связана с необходимостью совмещения точки касания линзы с пластинкой и оптической оси объектива. В этом случае можно воспользоваться помощью лаборанта или преподавателя.

Для определения цены деления шкалы окуляра используется объект-микрометр (рис. 2), на зеркальную поверхность которого нанесена шкала длиной 1 мм, разделённая на 100 частей.

Внимание! Во избежание повреждения зеркальной шкалы объект-микрометра не следует касаться её руками и протирать.

Питание осветителя микроскопа осуществляется через специальный блок или от постоянного напряжения 12 В, подведённого к двум клеммам лабораторного стола.

Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

1. Получите у лаборанта все необходимые принадлежности для работы на микроскопе.

2. Вставьте в микроскоп объектив с соответствующим увеличением и два окуляра ($\times 10$), один из которых должен иметь шкалу с делениями или сетку.

3. Поместите на предметный столик под объектив микроскопа обойму со стеклянной пластинкой и линзой.

4. Включите осветитель. С помощью трёх винтов на осветителе добейтесь максимальной освещённости поля зрения окуляра. При этом ручка поворотной призмы должна быть вдвинута до упора в тубусе микроскопа.

5. Поднимая или опуская тубус микроскопа винтом грубой настройки, найдите кольца; перемещая предметный столик, выведите их в центр поля зрения; винтом микрометрической подачи добейтесь максимальной резкости изображения.

6. Поставьте в гнездо трубки осветителя светофильтр для света с известной длиной волны.

7. Измерьте по одному разу диаметры первых пяти тёмных колец в делениях шкалы окуляра. Результаты измерений занесите в таблицу.

8. Поставьте светофильтр для света с неизвестной длиной волны; проделайте операции по п. 7. Результаты измерений занесите в таблицу.

Таблица

№ п/п	Номер кольца	Диаметр кольца для λ_1 d_{m1}, d_{n1} , дел.	Диаметр кольца для λ_2 d_{m2}, d_{n2} , дел.	Диаметр кольца для λ_1 d_{m1}, d_{n1} , м	Диаметр кольца для λ_2 d_{m2}, d_{n2} , м

$\lambda_1 = \dots\dots\dots$, нм.

9. Вместо обоймы, поместите на предметный столик под объектив микроскопа объект-микрометр, винтами грубой и микрометрической подачи тубуса получите резкое изображения его шкалы.

10. Отсчитайте число делений N окуляра, укладываемых на всей длине (1 мм) шкалы объект-микрометра. Найдите цену деления шкалы окуляра по формуле $n = 1 \text{ мм} / N$. С помощью найденного значения цены деления переведите диаметры колец в таблице из делений в метры.

11. Комбинируя попарно данные табл. 1 для каждых двух колец по формулам (2) и (3), рассчитайте 10 значений R и λ_2 , обозначая диаметр последующего кольца m_1 , а предыдущего n_1 , в случае использования светофильтра для известной длинны волны (λ_1). Соответственно m_2 и n_2 – для светофильтра с неизвестной длиной волны (λ_2).

12. Найдите средние значения R и λ_2 , а также их абсолютные погрешности.

13. По окончании измерений выключите осветитель, снимите объект-микрометр, объектив и окуляры и вместе с другими принадлежностями сдайте лаборанту.

Контрольные вопросы

1. В чём состоит волновая природа света? Что такое монохроматичность и когерентность волн?

2. Оптическая разность хода, условия максимума и минимума.

3. Объясните явление интерференции света на примере интерференции в тонких плёнках.

4. Как возникает интерференционная картина в виде колец Ньютона и от чего зависят размеры, число и цвет наблюдаемых колец?

5. Приведите примеры применения интерференции света в науке и технике.

ИЗУЧЕНИЕ ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЁТКИ

Цель работы: 1) ознакомление с отражательной дифракционной решёткой, применением её для определения длин волн линий спектра ртути, а также определение характеристик решётки; 2) ознакомление с устройством и работой гониометра.

Приборы и принадлежности: отражательная дифракционная решётка; гониометр; ртутная лампа.

Методические указания и описание установки

Отражательная дифракционная решётка представляет собой металлическую зеркальную пластинку, на которой через одинаковые интервалы d нанесено большое число штрихов. При попадании плоской световой волны на решётку, каждый элемент её поверхности является источником вторичных когерентных волн.

Если на пути лучей, отражённых от решётки, поставить собирающую линзу, то в её фокальной плоскости будет наблюдаться дифракционный спектр, состоящий из отдельных максимумов.

Эти максимумы возникают в тех направлениях, для которых оптическая разность хода световых волн, отражённых от соответствующих элементов соседних штрихов решётки, равна целому числу длин волн. В этом случае колебания от всех штрихов решётки приходят в определённые точки фокальной плоскости линзы в фазе и, следовательно, максимально усиливают друг друга. Из рисунка 1 видно, что оптическая разность хода Δ лучей, падающих на решётку 1 и 2 и отражённых от неё – $1'$ и $2'$, равна

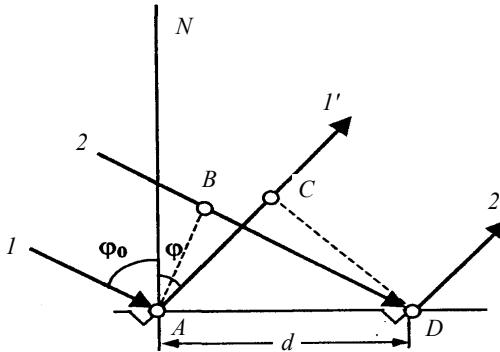


Рис. 1. Ход лучей при отражении от решётки

$$\Delta = BD - AC = d(\sin \varphi_0 - \sin \varphi),$$

где φ_0 – угол падения лучей; φ – угол дифракции.

Условие максимума имеет вид

$$\Delta = 2k \frac{\lambda}{2} = k\lambda,$$

где k – порядок дифракционного максимума ($k = 0, 1, 2, \dots$); λ – длина волны света.

Таким образом,

$$d(\sin \varphi_0 - \sin \varphi) = k\lambda, \quad (1)$$

т.е. для монохроматического света максимум интенсивности будет соответствовать углам φ , удовлетворяющим равенству (1).

Если же падающий свет не является монохроматическим, то решётка разложит его в спектр, состоящий из отдельных окрашенных линий. В направлении зеркального отражения ($\varphi = \varphi_0$) возникает максимум нулевого порядка ($k = 0$) для всех длин волн. Слева и справа от него возникнут дифракционные спектры различных порядков ($k = 1, 2, \dots$). В каждом из этих спектров максимумы более коротких длин волн располагаются ближе к нулевому максимуму.

На этом основано использование дифракционной решётки как спектрального прибора. Качество спектра зависит от угловой дисперсии и разрешающей способности прибора. Легко заметить также, что при освещении решётки светом с известной длиной волны по формуле (1) можно, измерив углы φ и φ_0 , найти постоянную решётки. Зная постоянную d , можно определить неизвестную длину волны светового излучения.

Установка для изучения дифракционных явлений состоит из гониометра (прибора для точного измерения углов), отражательной дифракционной решётки и источника света (ртутной лампы высокого давления).

Дифракционная решётка расположена на столике 11 гониометра (рис. 2).

Внимание! Ртутная лампа является источником мощного ультрафиолетового излучения, поэтому смотреть на свет лампы не рекомендуется.

*Если прибор отъюстирован, то трогать винты столика не разрешается. Прикасаться к поверхности дифракционной решётки **совершенно недопустимо**.*

Принципиальная схема хода лучей в гониометре с отражательной дифракционной решёткой дана на рис. 3.

Свет от источника, проходя через входную щель коллиматора, формируется в параллельный пучок и падает под углом φ_0 на поверхность дифракционной решётки. Дифрагированные под различными углами φ

лучи попадают в зрительную трубу, которая фокусирует их на сетчатку глаза.

Ширина входной щели (см. рис. 2) коллиматора 1 регулируется микрометрическим винтом 2. Это позволяет менять ширину наблюдаемых линий и их яркость. Фокусирующий винт 3 коллиматора служит для получения строго параллельного пучка лучей, падающих на дифракционную решётку.

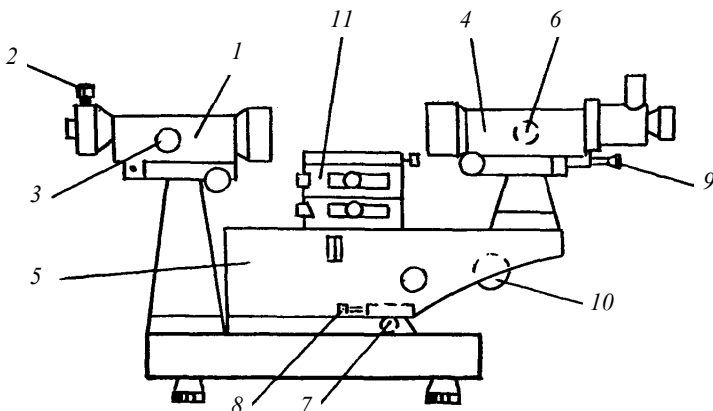


Рис. 2. Схема устройства гониометра

Зрительная труба 4 вместе с угломерной отсчётной системой укреплена на подвижном кронштейне (алидаде) 5, который может вращаться вокруг вертикальной оси, проходящей через центр столика. Фокусировка зрительной трубы осуществляется винтом 6. Вращение алидады производится вручную после освобождения стопорного винта 7. При закреплённом винте 7 можно производить тонкую подстройку в небольших пределах плавным вращением винта 8.

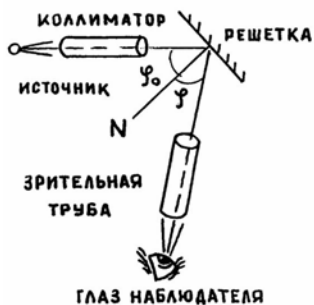


Рис. 3. Ход лучей для гониометра

Совместив перекрестье окуляра (визирный крест) зрительной трубы с серединой измеряемой линии (при затянутом винте 7), следует снять отсчёт через окуляр 9 отчётного устройства. Наблюдаемая при этом шкала лимба гониометра изображена на рис. 4. Для снятия отсчёта надо повернуть маховичок 10 оптического микрометра настолько, чтобы верхние и нижние двойные штрихи лимба точно совместились, как показано на рис. 4. Тогда число градусов будет равно

ближайшему левому от вертикального индекса числу верхней (неперевернутой) шкалы. Число десятков минут соответствует числу интервалов, заключённых между верхним двойным штрихом (число градусов) и нижним (перевернутым) цифрованным двойным штрихом, отличающимся на 180° .

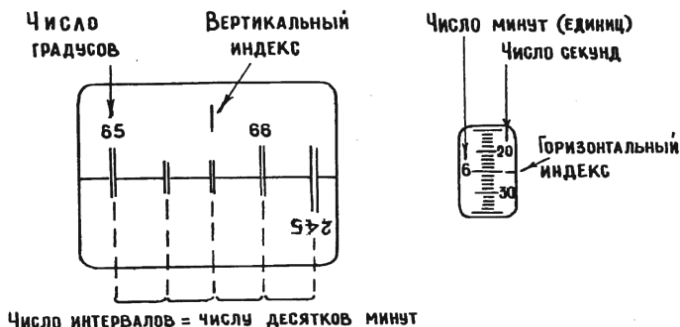


Рис. 4. Вид шкалы при измерении углов

Число единиц минут и секунд отсчитывается по шкале в правом окне поля зрения по левому ряду чисел (минуты) и правому ряду (секунды) с помощью неподвижного горизонтального индекса. Положение лимба, показанное на рис. 4, соответствует $65^\circ 46' 25''$.

Точность однократного измерения угла гониометром согласно паспортным данным составляет $5''$.

Расчёт длин волн спектра ртути и определение характеристик решётки

Спектр ртути представляет собой совокупность отдельных линий разной интенсивности. В зависимости от срока службы лампы относительная интенсивность линий может несколько изменяться. В связи с этим, а также в силу индивидуальных особенностей глаза наблюдателя, число видимых линий лежит обычно в пределах 10 – 25.

Для определения длин волн линий необходимо измерить углы дифракции, соответствующие этим линиям, и знать период решётки. Последний может быть найден из соотношения (1) для линии в спектре первого порядка ($k = 1$) с известной длиной волны (она задаётся преподавателем), т.е.

$$d = \frac{\lambda_{\text{изв}}}{\sin \varphi_0 - \sin \varphi}, \quad (2)$$

где φ_0 – угол падения лучей на решётку; φ – угол дифракции световой волны с известной длиной.

Тогда длина волны λ_i любой из неизвестных линий в спектре с $k = 1$, находится по формуле

$$\lambda_i = d(\sin \varphi_0 - \sin \varphi_i), \quad (3)$$

здесь φ_i – угол дифракции соответствующей искомой линии спектра.

Основными характеристиками всякого спектрального прибора являются его *дисперсия* и *разрешающая сила*.

Угловой дисперсией называют величину

$$D = \frac{d\varphi_i}{d\lambda_i} \approx \frac{\Delta\varphi_i}{\Delta\lambda_i}, \quad (4)$$

определяющую угловое расстояние $\Delta\varphi$ между двумя спектральными линиями, отличающимися по длине волны на $\Delta\lambda$.

Угловая дисперсия дифракционной решётки может быть также определена и из соотношения

$$D = \frac{1}{d \cos\varphi} \quad (5)$$

по одной из двух соседних линий в спектре первого порядка. Правильно вычисленные по формулам (4) и (5) значения D должны быть сравнимы.

Разрешающей силой называют безразмерную величину

$$R = \lambda_1 / \Delta\lambda = \lambda_1 / (\lambda_1 - \lambda_2) = kN, \quad (6)$$

характеризующую возможность разрешения спектральным прибором в виде отдельных спектральных линий, двух мало отличающихся по длине (на $\Delta\lambda$) световых волн. Эта величина численно равна произведению порядка спектра (k) на полное число щелей решётки N .

Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

1. Включить гониометр. Установить зрительную трубу 4 (рис. 2, 3) в направлении нормали к решётке. Для этого нужно найти изображение светлого автоколлимационного креста, совместить его точно с перекрестием окуляра трубы, с помощью винта б добиться его чёткого изображения. Пользуясь отсчётным устройством, как показано на рис. 4, измерить угол креста φ_+ , соответствующий нормали. Замер занести в таблицу.

2. Включить ртутную лампу. С помощью микрометрического винта 2 настроить изображение спектра так, чтобы линии были достаточно узкие и яркие. Они должны быть ограничены по высоте, а их середины лежать на одном уровне по горизонтали. Винтом 3 тщательно сфокусировать эти линии.

3. Отсчётным устройством 9 замерить относительные углы $\varphi_{i \text{отн}}^*$, соответствующие всем видимым линиям спектра первого порядка, а так-

же угол белой линии φ_0 (нулевой порядок). Результаты всех измерений занести в таблицу.

Примечание. Измерения проводить по возможности быстро, так как через 15...20 мин работы ртутная лампа перегревается и автоматически отключается. Повторное её зажигание возможно только после остывания (20...30 мин).

4. Выключить ртутную лампу и гониометр. Узнать у преподавателя длину волны какой линии считается известной.

5. По формулам (2) и (3) рассчитать значения периода решётки d и длины волны λ_i всех видимых линий спектра первого порядка. Полученные величины занести в таблицу.

6. Используя соотношения (4–6), вычислить основные характеристики дифракционной решётки: угловую дисперсию D и разрешающую способность R и также внести их в таблицу.

Таблица

№	Цвет линии	φ_+	φ_0	$\varphi_{i \text{ отн}}^*$	$\varphi_i = \varphi_{i \text{ отн}} - \varphi_+$	d	λ_i	D	R
0	Белая								
1									
2									
...									

$$\lambda_{\text{изв}} = \dots, \text{ нм.}$$

7. Исходя из погрешности однократного измерения угла гониометра (~5 сек), оценить точность определения длин волн и параметров решётки.

8. Конечные результаты дать в виде

$$d = d \pm \Delta d; \quad \lambda_i = \lambda_i \pm \Delta \lambda; \quad D = D \pm \Delta D; \quad R = R \pm \Delta R.$$

* Так как отсчётное устройство гониометра позволяет измерять лишь относительные углы $\varphi_{i \text{ отн}}$ линий (относительно определённого фиксированного направления, принято за начало отсчёта), то для нахождения истинного значения угла φ_i (относительно нормали к решётке) необходимо вычесть из угла $\varphi_{i \text{ отн}}$ угол φ_+ , соответствующий нормали

$$\varphi_i = \varphi_{i \text{ отн}} - \varphi_+.$$

Контрольные вопросы

1. Что такое дифракция света? Основные положения принципа Гюйгенса–Френеля.

2. Дифракционная решётка, её основные характеристики (постоянная решётки, дисперсия, разрешающая сила).
 3. Понятие спектра, порядок следования линий в спектре, цвета линий.
 4. Применение дифракции.
 5. Что такое волновая поверхность, фронт волны, луч.
 6. Какие волны называются плоскими, сферическими?
 7. Чем отличается дифракция Френеля от дифракции Фраунгофера?
- Какой тип дифракции наблюдается в работе?

8. Как располагаются спектры для различных длин волн относительно друг друга?

9. Дайте определение дифракционной решётки, периода дифракционной решётки. Как связан период дифракционной решётки с числом штрихов на единицу длины?

10. Как получаются максимумы интенсивности от дифракционной решётки или нескольких щелей?

11. Как получаются минимумы и вторичные максимумы от дифракционной решётки? Под какими углами они возникают?

Лабораторная работа 14

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ САХАРА В РАСТВОРЕ С ПОМОЩЬЮ САХАРИМЕТРА

Цель работы: определить постоянную удельного вращения и неизвестную концентрацию раствора сахара.

Приборы и принадлежности: сахариметр универсальный СУ-3; кювета с раствором сахара известной концентрации; кювета с раствором сахара неизвестной концентрации.

Методические указания и описание установки

Некоторые вещества, называемые оптически активными, обладают способностью вращать плоскость поляризации проходящего через них плоскополяризованного света. К числу таких веществ принадлежат кристаллические тела (кварц, киноварь), жидкости (скипидар, никотин, нефть) и растворы оптически активных веществ в неактивных растворителях (водные растворы сахара, винной кислоты, белков).

В случае раствора, угол поворота плоскости поляризации пропорционален толщине (l) проходящего светом слоя и концентрации активного вещества (C):

$$\varphi = [\alpha]Cl,$$

где $[\alpha]$ – величина, называемая постоянной удельного вращения или просто удельным вращением. Эта величина сильно зависит от длины волны

света, определяется опытным путём и для разных веществ приводится в справочных таблицах.

Для измерения угла поворота плоскости поляризации света при прохождении через вещество применяются специальные приборы – поляриметры.

С их помощью можно весьма точно и быстро определять толщину оптически активного вещества и его концентрацию. Поляриметры, используемые для измерения концентрации сахара, называются сахариметрами.

Рассмотрим оптическую схему и принцип действия полутеневого сахариметра (рис. 1).

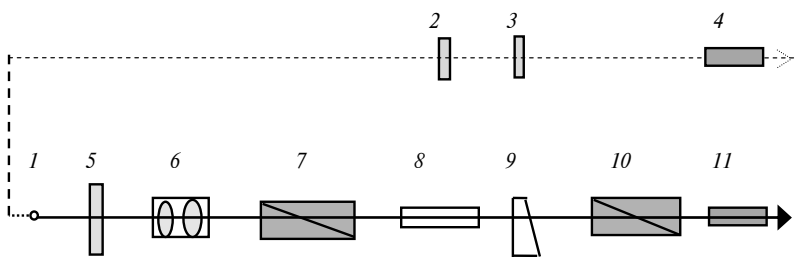


Рис. 1. Оптическая схема сахариметра

Свет от источника *1* (лампа накаливания) делится на два пучка. Один из них (на рис. 1 показан пунктиром) служит для освещения шкалы *2* и нониуса *3* прибора, которые рассматриваются через окуляр *4*. Второй пучок света проходит через светофильтр *5*. Система линз *6* (конденсор) формирует параллельный пучок света, который поступает на вход поляризатора *7* (призма Николя).

Получающийся плоскополяризованный свет проходит последовательно через кювету с раствором сахара *8*, компенсатор *9* (клин переменной толщины, изготовленный из правовращающего кварца) и попадает на вход анализатора *10* (призма Николя или поляроидная плёнка). Визуальное наблюдение осуществляется через окуляр зрительной трубы *11*.

Если главные плоскости пропускания поляризатора и анализатора образуют прямой угол, а оптически активное вещество между ними отсутствует, то свет через такую систему не пройдёт, и поле зрения трубы будет тёмным.

В присутствии активного вещества плоскость поляризации повернётся на некоторый угол, и в соответствии с законом Малюса, интенсивность света за анализатором уже не будет равной нулю, при этом поле зрения просветляется. Чтобы вновь добиться полного затемнения, необходимо повернуть анализатор на угол, равный углу поворота плоскости поляриза-

ции света после прохождения через активное вещество. Однако человеческий глаз не может достаточно точно оценить момент наибольшего затенения. Поэтому на практике применяется так называемый полутеневого метод. Его идея основана на следующем очевидном соображении. Если некоторая величина незначительно меняется вблизи своего максимума или минимума, то, для того чтобы более точно определить положение соответствующего экстремума, надо эту величину (или что-то связанное с ней) заставить изменяться сильнее.

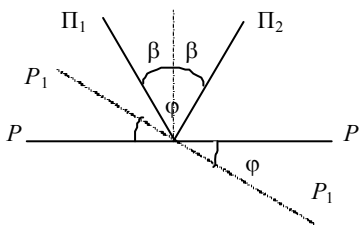


Рис. 2. Пояснение к закону Малюса

С этой целью в полутеневом сахариметре обычная призма Николя, используемая в качестве анализатора (или поляризатора), разрезана вдоль главной плоскости пропускания на две равные части. Полученные грани сошлифованы на клин под небольшим углом $\beta = 2 \dots 2,5^\circ$, а затем обе половинки вновь склеены. При этом плоскости пропускания Π_1 и Π_2 обеих половинок анализатора образуют между собой малый угол 2β (рис. 2), а круглое поле зрения будет разделено пополам вертикальной линией (рис. 3). Если плоскость поляризации PP света (рис. 2 и 3, б), выходящего из поляризатора, перпендикулярна биссектрисе угла между главными плоскостями половинок анализатора Π_1 и Π_2 , то обе половинки поля зрения освещены одинаково:

$$I_1 = I_2 = I_0 \sin^2 \beta,$$

где I_0 – интенсивность плоскополяризованного света, падающего на анализатор, а I_1 и I_2 – интенсивности света, пропускаемые соответственно половинками анализатора, т.е. поле зрения уже не будет полностью тёмным, а полутёмным (рис. 3, б).

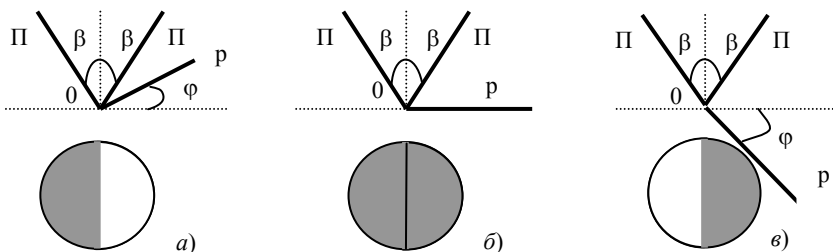


Рис. 3. Поле зрения анализатора

Если плоскость PP повернется на угол φ в положение P_1P_1 (рис. 2), то интенсивности света выходящего из обеих половинок анализатора станут неодинаковыми:

$$I_1 = I_0 \sin^2(\beta + \varphi), \quad I_2 = I_0 \sin^2(\beta - \varphi).$$

Таким образом, даже небольшой поворот плоскости поляризации света OP после прохождения через активное вещество, приводит к значительному нарушению равенства освещённостей обеих половинок поля зрения (рис. 3, *a, в*).

Если после установки прибора на равенство освещённостей двух половинок анализатора поместить между поляризатором и анализатором исследуемое вещество, то обе половины поля зрения будут освещены не одинаково. Для восстановления равенства освещённостей анализатор надо повернуть на угол φ , равный углу поворота плоскости поляризации активным веществом.

В сахариметре анализатор не вращается. Освещённость уравнивают клиновидным кварцевым компенсатором. Кварц является также оптически активным веществом, который вращает плоскость поляризации света, проходящего через него, в противоположном, чем раствор сахара, направлении. Смещая кварцевый клин с помощью микрометрического винта (кремальерная передача) перпендикулярно лучу, т.е. меняя толщину его рабочей части, можно скомпенсировать поворот плоскости поляризации раствором сахара и восстановить равную освещённость полей зрения. Линейное перемещение клина пропорционально углу поворота плоскости поляризации, поэтому прибор проградуирован в так называемых градусах сахарной шкалы.

В работе используется универсальный сахариметр СУ-3 (оптическая схема показана на рис. 1) и входящие в его комплект кюветы с раствором сахара известной и неизвестной концентрации. Длина каждой кюветы равна 2 дм. Поле зрения нижнего окуляра разделено пополам вертикальной линией. Верхний окуляр служит для снятия отсчёта угла поворота плоскости поляризации раствором сахара. Оба окуляра позволяют фокусировать наблюдаемые в них изображения. Используя нониус верхнего окуляра, можно измерять угол с точностью до $0,1^\circ$ (аналогичный принцип используется в штангенциркуле).

Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

1. Включите сахариметр в сеть переменного тока с напряжением 220 В.

2. Настройте оба окуляра на резкость, при этом в нижнем окуляре должна быть чётко видна граница полей зрения, а в верхнем – деления основной шкалы и нониуса.

3. Снимите нулевой отсчёт. Для этого, не вставляя в прибор кювету с раствором сахара, с помощью ручки кремальерной передачи добейтесь равенства освещённостей обеих половин поля зрения нижнего окуляра. Отсчёт угла φ_{0i} произведите с помощью верхнего окуляра. Опыт выполните 5 раз и результаты занесите в табл. 1.

4. Вставьте в прибор кювету с раствором сахара известной концентрации C_1 . Произведите 5 опытов аналогично п. 3. Полученные значения углов φ_{1i} занесите в табл. 2.

5. Вставьте в прибор кювету с раствором сахара неизвестной концентрации C_x . Произведите 5 опытов аналогично п. 3. Полученные значения углов φ_{2i} занесите в табл. 3.

Таблица 1

№ п/п	φ_{0i}	$\Delta\varphi_{0i}$	$\varphi_{0\text{ ср}}$	$\Delta\varphi_{0\text{ ср}}$	$E_0, \%$
1					
2					
3					
4					
5					

Таблица 2

№ п/п	φ_{1i}	$\Delta\varphi_{1i}$	$\varphi_{1\text{ ср}}$	$\Delta\varphi_{1\text{ ср}}$	$E_1, \%$
1					
2					
3					
4					
5					

Таблица 3

№ п/п	φ_{2i}	$\Delta\varphi_{2i}$	$\varphi_{2\text{ ср}}$	$\Delta\varphi_{2\text{ ср}}$	$E_2, \%$
1					
2					
3					
4					
5					

6. Рассчитайте удельную постоянную вращения для сахара по формуле

$$[\alpha] = \frac{\varphi_1 - \varphi_{0\text{ср}}}{C_1 l},$$

где C_1 – известная концентрация сахара в растворе в %; l – длина кюветы.

7. Найдите неизвестную концентрацию сахара в растворе по формуле

$$C_2 = C_1 \frac{\varphi_{2\text{ср}} - \varphi_{0\text{ср}}}{\varphi_{1\text{ср}} - \varphi_{0\text{ср}}}.$$

8. Рассчитайте абсолютные и относительные погрешности измерений $[\alpha]$ и C_2 .

Контрольные вопросы

1. Естественный и поляризованный свет.
2. Поляризатор и анализатор. Закон Малюса. Поляризация света при отражении. Закон Брюстера.
3. Явление двойного лучепреломления. Призма Николя.
4. Вращение плоскости поляризации.
5. Применения поляризованного света
6. Принцип действия сахариметра.
7. Что представляет собой свет? Расскажите о взаимной ориентации векторов напряжённостей электрического и магнитного полей.
8. Чему равна интенсивность прошедшей волны при падении на поляризатор плоскополяризованного света?
9. Чему равна интенсивность прошедшей волны при падении на поляризатор естественного света?
10. Чему равна интенсивность прошедшей волны при падении на поляризатор частично поляризованного света?
11. Чему равна степень поляризации естественного света? Плоскополяризованного?
12. Чему равны максимальная и минимальная интенсивности частично поляризованного света?

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА

Цель работы: 1) изучение движения заряженных частиц в скрещенных электрическом и магнитном полях; 2) экспериментальное определение удельного заряда электрона и расчёт траектории движения.

Приборы и принадлежности: коммерческая лабораторная установка с блоком питания и компьютером.

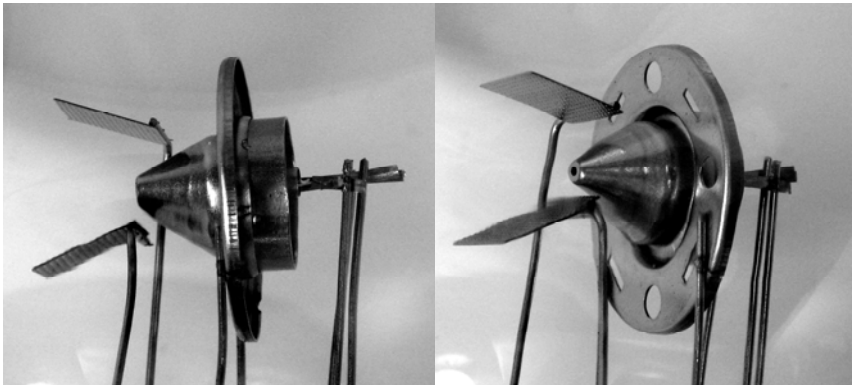
Методические указания и описание установки

Катод 1 электронной пушки (рис. 1 а, б), подключённый к источнику питания, при пропускании по нему электрического тока накаливается, и в результате термоэлектронной эмиссии, испускает электроны со средней кинетической энергией:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2}kT.$$

Между катодом и анодом приложена разность потенциалов U , ускоряющая электроны. По закону сохранения энергии скорость v электронов, достигающих анода, определяется формулой

$$\frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2} = eU. \quad (1)$$



а)

б)

Рис. 1. Устройство электронной пушки

При $U \sim 10^2 \dots 10^4$, В $\frac{mv_0^2}{2} \ll eU$ и с достаточной степенью точности можно полагать, что

$$\frac{mv^2}{2} = eU. \quad (2)$$

Отсюда скорость вылета электронов из электронной пушки равна

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m}}. \quad (3)$$

Анод 2 электронной пушки (рис. 1) – металлический конус с узким отверстием, через которое выходит тонкий пучок «монохроматических», т.е. обладающих практически одинаковыми по величине и направлению скоростями, электронов. Так устроена электронная пушка или электронный прожектор в лабораторной установке.

Газ низкого давления, находящийся в стеклянной колбе лампы (рис. 2), в которой располагается электронная пушка, под действием пучка электронов ионизируется и испускает заметное зеленоватое свечение в месте локализации пучка электронов.

Помещённая в центр системы катушек Гельмгольца лампа с электронной пушкой находится в области с однородным магнитным полем. Магнитная индукция, ориентированная вдоль оси катушек, направлена перпендикулярно электронному пучку, генерируемому пушкой.

На заряд e , движущийся со скоростью v в однородном магнитном поле с индукцией B , магнитное поле действует с силой

$$\vec{F} = e[\vec{v}\vec{B}]. \quad (4)$$

Эта сила называется силой Лоренца. В соответствии с формулой (4) сила Лоренца перпендикулярна плоскости, в которой расположены векторы \vec{v} и \vec{B} , модуль силы Лоренца равен



Рис. 2. Электронная лампа с пушкой

$$F_{\perp} = e\nu B \sin\varphi, \quad (5)$$

где φ – угол между векторами $\vec{\nu}$ и B . Следовательно, заряженная частица, двигающаяся вдоль силовой линии магнитного поля, не испытывает действия силы.

Направление действия силы Лоренца перпендикулярно плоскости, в которой лежат векторы $\vec{\nu}$ и \vec{B} . Если заряд e положителен, направление вектора силы \vec{F}_{\perp} совпадает с направлением вектора $[\vec{\nu}\vec{B}]$. В случае отрицательного e направление векторов \vec{F}_{\perp} и $[\vec{\nu}\vec{B}]$ противоположны. Для определения направления силы Лоренца, действующей на положительный заряд, можно пользоваться правилом буравчика, либо правилом левой руки.

Правило левой руки гласит: *если расположить левую руку так, чтобы вектор \vec{B} входил в ладонь, а четыре сложенных пальца были направлены вдоль вектора $\vec{\nu}$, то отставленный большой палец укажет направление силы, действующей на положительный заряд*. В случае, когда заряд отрицателен, найденное таким способом направление силы F_{\perp} надо поменять на обратное.

Сила Лоренца всегда направлена перпендикулярно к скорости движения частицы, поэтому она работы над частицей не совершает. Следовательно, действуя на заряженную частицу постоянным магнитным полем, изменить её энергию нельзя.

Пусть заряд e влетает в однородное магнитное поле со скоростью ν , перпендикулярной вектору \vec{B} . Под действием силы Лоренца

$$F_{\perp} = e\nu B$$

заряд приобретает постоянное по величине нормальное ускорение

$$a_n = \frac{F_{\perp}}{m} = \frac{e}{m} \nu B. \quad (6)$$

Если скорость изменяется только по направлению, движение с постоянным по величине нормальным ускорением представляет собой равномерное движение по окружности, радиус которой определяется условием

$a_n = \frac{\nu^2}{R}$. Подставляя это выражение в (6), получим уравнение движения, которое по второму закону Ньютона определяется уравнением

$$e\nu B = m \frac{\nu^2}{R}, \quad (7)$$

решая получившееся уравнение относительно R , получим

$$R = \frac{mv}{eB}. \quad (8)$$

Таким образом, в однородном поперечном магнитном поле заряженная частица движется по окружности.

Подставляя скорость частицы (3) в (8), получим выражение для удельного заряда – отношения заряда частицы к её массе – e/m :

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{R^2 B^2}, \quad (9)$$

откуда

$$R = \frac{1}{\sqrt{e/m}} \frac{\sqrt{2U}}{B}. \quad (10)$$

Как следует из формулы (10) радиус окружности R , по которой изгибается электронный пучок в магнитном поле (рис. 3), зависит от ускоряющего напряжения U , магнитной индукции B поля и удельного заряда частицы – отношения заряда частицы к её массе – e/m). Идея эксперимента сводится к построению ряда экспериментальных точек зависимости радиуса окруж-

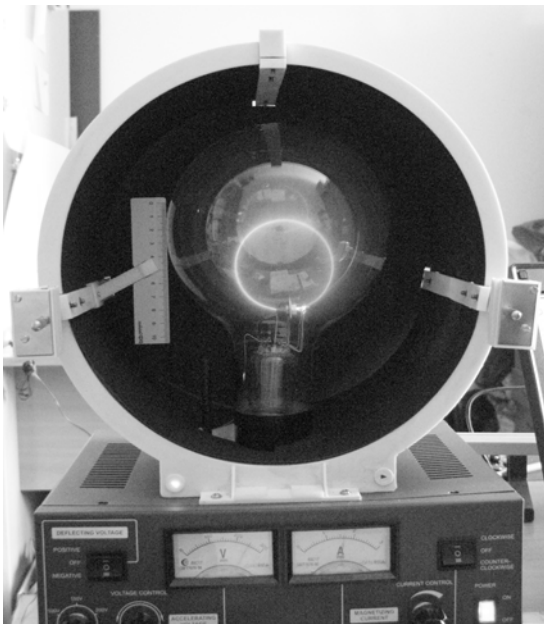


Рис. 3. Вид пучка электронов в электронной лампе

ности R (измеряется с помощью веб-камеры) от величины $\frac{\sqrt{2U}}{B}$, определяемой ускоряющим напряжением U в электронной пушке, и величиной магнитной индукции B во внутренней области катушек Гельмгольца.

Согласно (10) эта зависимость должна быть линейна. Если провести линейную аппроксимацию $R = k \frac{\sqrt{2U}}{B}$ полученных экспериментальных

значений зависимости $R = f\left(\frac{\sqrt{2U}}{B}\right)$, то коэффициент пропорционально-

сти k оптимальной прямой связан с величиной удельного заряда электрона: $k = \frac{1}{\sqrt{e/m}}$, откуда окончательно получаем

$$\frac{e}{m} = \frac{1}{k^2}. \quad (11)$$

Лабораторный стенд (рис. 4) представляет собой заключённые в непрозрачный кожух 1 систему катушек Гельмгольца 2, внутри которой установлена электронная лампа 3 с электронной пушкой. В установку входят блок питания электронной пушки и катушек Гельмгольца 4.


К приборам и принадлежностям относятся компьютер, необходимое программное обеспечение, датчик магнитного поля (датчик Холла) 5, веб-камера 6, измерительный кабель и концентратор для подключения датчиков к компьютеру.

Кроме перечисленных, в состав лабораторной установки входит линейка с миллиметровой шкалой 7 (рис. 4). Она предназначена для установки масштаба изображения окружности, образованной светящимся газом на пути электронного пучка, зафиксированного веб-камерой.

Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

1. Соберите лабораторную установку, подключив датчик Холла к входу концентратора, подсоединив последний к USB-входу компьютера. Подключите к компьютеру веб-камеру. К другому входу концентратора подключите датчик, показывающий ускоряющее напряжение электронной пушки.

2. Включите прибор (переключатель «Power») и дайте ему прогреться в течение 5 мин.

3. Включите компьютер и запустите программу «Практикум по физике». На панели устройств выберите соответствующий сценарий проведения эксперимента (Alt + C) .

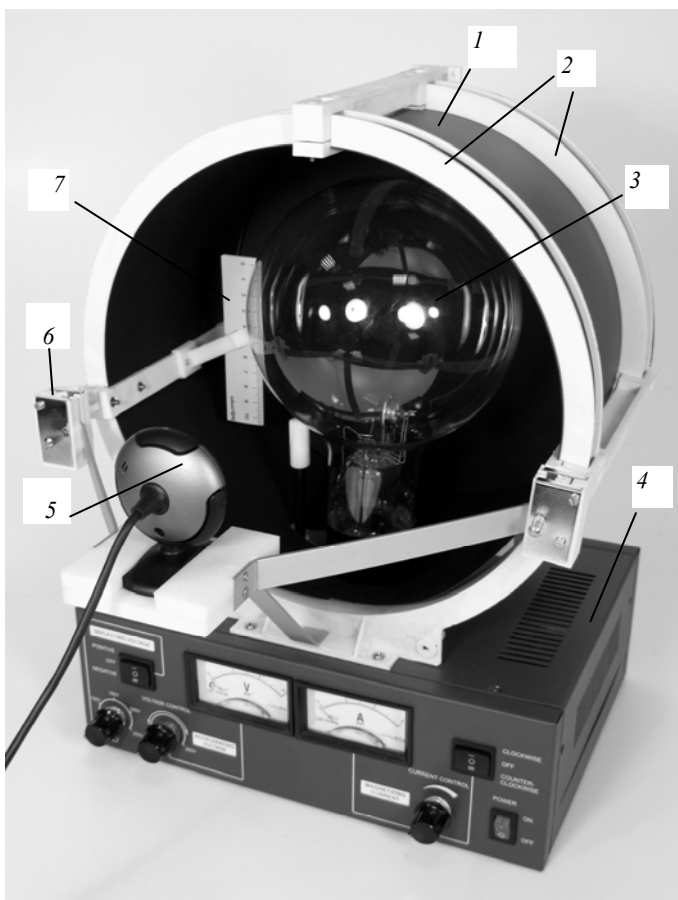


Рис. 4. Лабораторный стенд

4. Направьте ток в катушках по часовой стрелке (переключатель направления тока – вверх) и установите максимальный ток в катушках, повернув регулятор тока на передней панели корпуса установки до упора вправо.

5. Приложите ускоряющее напряжение на электронную пушку, повернув соответствующий регулятор на передней панели корпуса установки.

6. Запустите измерения, выбрав на панели инструментов кнопку «Запустить измерения». На экране появится окно «Обработка».

7. Опустите защитный козырёк.

8. Изменяя ускоряющее напряжение (от 250 до 100 В), сохраняйте фотографии траектории движения электронов, значение ускоряющего

напряжения и индукции магнитного поля, нажимая на кнопку с символом «дискета» после каждого изменения ускоряющего напряжения. Все данные будут записываться в таблицу, вид которой представлен в табл. 1.

9. Повторите измерения ускоряющего напряжения и радиуса траектории движения электронов для различных значений магнитной индукции, которая изменяется при уменьшении тока в катушках.

10. По окончании эксперимента остановите измерения, нажав на кнопку «стоп».

Таблица 1

№ измерения	Ускоряющее напряжение U , В	Магнитная индукция B , мТл.	Радиус окружности R , Ом	Фото
1				
...				
...				

11. Обработайте фотографии, получив значения радиуса траектории движения электронов при различных значениях ускоряющего напряжения и магнитного поля.

12. Для этого войдите в режим работы с фотографией, кликнув три раза по необходимому ярлыку в столбце «фото» таблицы результатов.

13. Задайте величину масштабного отрезка, сопоставив его со шкалой на изображении так, чтобы он совпадал с расстоянием 10 мм.

14. Выберите на панели инструментов окна регистрации данных «Установка длины масштабного отрезка» и ввести длину масштабного отрезка (1, 0).

15. Аппроксимируйте траекторию движения электронов окружностью, выбрав на панели инструментов соответствующую кнопку. Сопоставьте окружность с траекторией электронов, при необходимости растягивая, удерживая курсор на окружности.

16. Подберите наиболее подходящую окружность, перейти в таблицу результатов. Нажмите ОК в верхнем правом углу окна «Камера».

17. Повторите п. 12 и пп. 15–16 для всех файлов в столбце «фото» таблицы результатов.

18. Постройте зависимость R ($(2U)^{0,5}/B$).

19. Выполните аппроксимацию линейной зависимостью, нажав соответствующую кнопку на панели инструментов в окне «Обработка».

20. Перейдите в окно «Статистика».

21. Получите значение удельного заряда электрона.

Внимание!

1. Перед выполнением работы получите инструктаж у лаборанта.
2. Соблюдайте общие правила техники безопасности работы в лаборатории «Физика».
3. Осторожно обращайтесь со стеклянной лампой.
4. Установка включается в сеть только лаборантом или преподавателем.
5. При неисправности установки её следует немедленно выключить и сообщить об этом лаборанту или преподавателю. Строго запрещается производить исправления неполадок установки самостоятельно.
6. Обязательно выполнение общих правил по технике безопасности при работе в лаборатории «Электричество».

Контрольные вопросы

1. Как определить величину и направление силы Лоренца?
2. Как определить радиус движения электрона в однородном магнитном поле?
3. Как определить величину и направление силы, действующей на частицу, движущуюся в электрическом и магнитном полях?
4. Как определить траекторию движения частицы в электрическом и магнитном полях?

Лабораторная работа 16

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФРАКЦИИ ФРАУНГОФЕРА НА ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЁТКЕ

Цель работы: 1) изучение метода наблюдения дифракции с помощью дифракционной решётки; 2) определение длины волны монохроматического света с помощью дифракционной решётки.

Приборы и принадлежности: лабораторный стенд; набор дифракционных решёток; компьютер с программным обеспечением.

Методические указания и описание установки

Пусть на дифракционную решётку (рис. 1) с параметром d нормально падает плоская волна длиной λ , тогда углы дифракции, под которыми наблюдаются главные максимумы, определяются условием

$$d \sin \varphi = \pm m \lambda, \quad (1)$$

а углы, под которыми наблюдаются главные минимумы –

$$d \sin \varphi = \pm \left(m + \frac{1}{2} \right) \lambda, \quad (2)$$

$m = 0, 1, 2, \dots$ называется **порядком** максимума или минимума. Углы, под которыми наблюдаются второстепенные минимумы, удовлетворяют условию

$$d \sin \varphi = \pm \left(m + \frac{p}{N} \right) \lambda, \quad p = 1, 2, \dots, N - 1, \quad (3)$$

где N – число штрихов решётки. Таким образом, угловая ширина главных максимумов дифракционной решётки, равная угловому расстоянию между соседними с ним второстепенными минимумами, $\delta\varphi = 2\lambda / Nd = 2\lambda / l$, где l – длина решётки.

Амплитуда волн в главных максимумах в N раз больше амплитуды волн максимумов, даваемых одной щелью. Из условий (1) и (3) следует, что между двумя главными максимумами (рис. 1) располагается $(N - 1)$ дополнительных минимумов, разделённых вторичными максимумами. Максимально возможный порядок спектра определяется из условия (1) при $\varphi = 90^\circ$:

$$m_{\max} = \left[\frac{d}{\lambda} \right]. \quad (4)$$

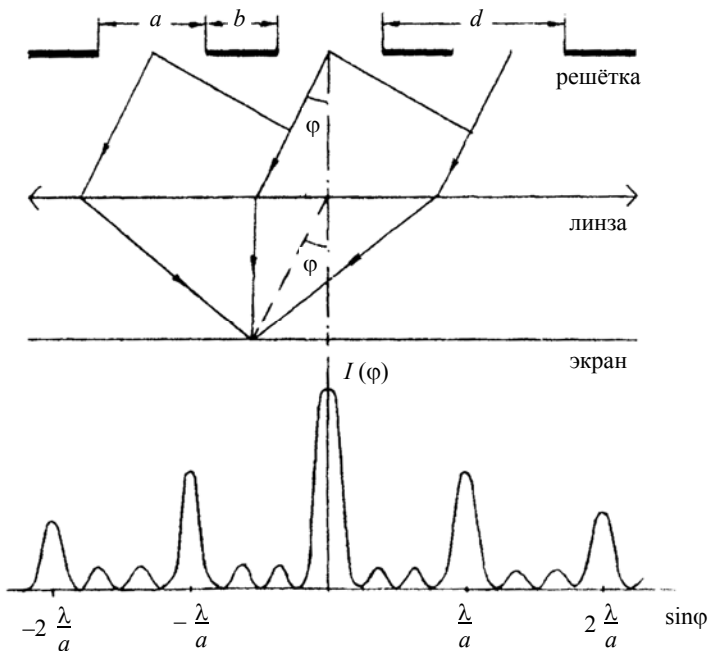


Рис. 1. Дифракция Фраунгофера

Интенсивность дополнительных максимумов значительно ниже интенсивности главных, вследствие чего дополнительные максимумы на экране обычно не наблюдаются, а создают весьма слабый фон.

Дифракционная решётка – важнейший спектральный прибор, предназначенный для разложения света в спектр и измерения длин волн. Она представляет собой множество (до сотен тысяч) одинаковых равноотстоящих друг от друга прозрачных щелей в непрозрачном экране. Главные максимумы дифракционной картины образуются в тех направлениях, в которых лучи от всех щелей приходят в одной фазе, поэтому интенсивность в максимумах в N^2 больше, чем от одной щели. Между главными максимумами расположено по $N - 1$ второстепенных минимумов. Поэтому, чем больше у решётки штрихов, тем больше интенсивность в максимумах и меньше их ширина, а, следовательно, и спектральная разрешающая способность решётки.

Для оценки длины волны света, излучаемого полупроводниковым лазером, воспользуемся формулой (1). Из неё следует:

$$\lambda = \frac{d \sin \varphi}{m}, \quad (5)$$

где d – период решётки; m – порядок главного максимума; φ – угол отклонения (дифракции).

Углы отклонений главных максимумов от прямолинейного распространения можно определить по смещению x максимума m -порядка. При известном расстоянии L от решётки до экрана (измеряется линейкой) котангенс этого угла определяется отношением

$$\operatorname{ctg} \varphi = L / x. \quad (6)$$

Поскольку из тригонометрии $\sin \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \varphi}}$, то получим:

$$\lambda = \frac{d}{m \sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \varphi}} = \frac{d}{m \sqrt{1 + (L/x)^2}}, \quad (7)$$

или окончательно расчётную формулу для лабораторной работы:

$$\lambda = \frac{dx}{m \sqrt{x^2 + L^2}}. \quad (8)$$

Лабораторный стенд (рис. 2) включает блок с излучателем 1, блок с дифракционной решёткой 2, на корпусе которого установлена веб-камера, блок сменных дифракционных решёток 4. Дифракционная картина наблюдается на экране 5, внизу которого прикреплена миллиметровая линейка.

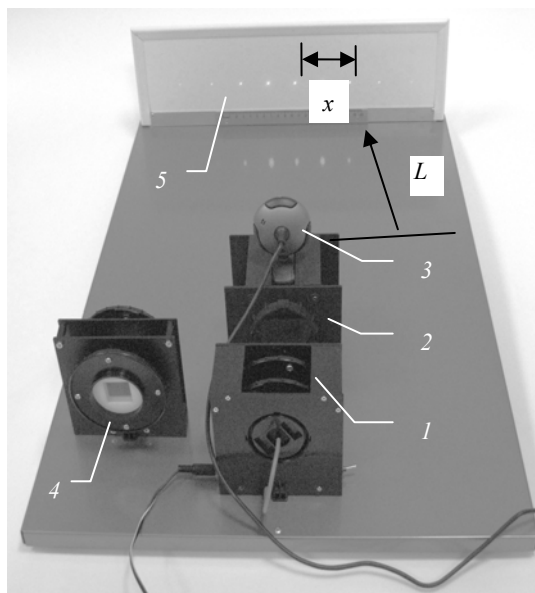


Рис. 2. Лабораторный стенд

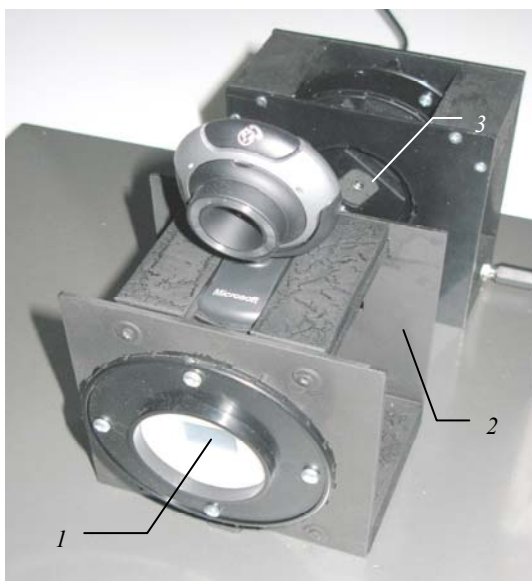


Рис. 3. Блок решётки, лазера и веб-камеры


К приборам и принадлежностям относится также компьютер с необходимым программным обеспечением.

В работе используется три дифракционных решётки с различной плотностью штрихов: 50, 150 и 500 штрихов на миллиметр.

Период, или шаг дифракционной решётки, легко определить как обратную величину от её плотности.

Одна решётка (рис. 3, поз. 1) стоит в блоке (рис. 3, поз. 2) с веб-камерой (рис. 2, поз. 3). Две остальные размещаются в блоке сменных решёток (рис. 2, поз. 4), установленном отдельно. На блоке (рис. 3, поз. 2) со стороны, обращённой к полупроводниковому лазеру (рис. 3, поз. 3), установлен поляризационный фильтр (рис. 2, поз. 6). При вращении поляризатора вокруг оси меняется пропускная способность фильтра, позволяя тем самым установить приемлемую для съёмки веб-камерой яркость дифракционной картины на экране установки.


Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

1. Включите установку, подсоединив камеру к USB-порту компьютера. После включения компьютера запустите программу «Практикум по физике». На панели устройств выберите соответствующий сценарий проведения эксперимента (Alt + C) .

2. Выберите на панели инструментов кнопку «Работа с камерой» .

3. Установите дифракционную решётку с плотностью 50 штрихов/мм.


4. Измерьте расстояние от экрана до дифракционной решётки. Запишите его значение: $L =$ мм.

5. В рабочем окне «Камера» произведите запись с помощью кнопки «Включение и выключение записи данных камеры» .

6. Выполните пп. 3–4 ещё дважды, используя дифракционные решётки с плотностью 150 и 500 штрихов/мм.

7. Занесите полученные данные в табл. 1.

8. Приступите к обработке записанной информации в окне файла изображения.

9. Перемещая и растягивая мышью единичный отрезок , сопоставьте его со шкалой на изображении так, чтобы он совпадал с длиной линейки на экране, равной 100 мм.





10. Выберите на панели инструментов окна регистрации данных «Установка длины масштабного отрезка»  и введите длину масштабного отрезка (100).

Таблица 1

Плотность решётки, штр/мм	Период решётки, d , мм	Порядок главного максимума m	Координата главного максимума x , мм	Длина волны, по (8) λ , мкм	Средняя длина волны $\langle \lambda \rangle$, мкм
50		1			
		2			
		3			
		4			
150		1			
		2			
		3			
		4			
500		1			

11. Перемещая и растягивая мышью систему координат , поместите её центр в нулевой максимум дифракционной картины, а ось X сориентируйте в плоскости дифракционной картины.

12. В правом окне регистрации данных на панели инструментов выберите инструмент  «Добавление точки к изображению» и зафиксируйте его кнопкой .

13. Пометьте точками дифракционные максимумы четырёх порядков и определите координаты x каждого главного максимума. Запишите их в табл. 1.

14. Используя полученные данные и определив расстояние от дифракционной решётки до экрана по линейке, произведите расчёт длины волны излучения по формуле (8).

Внимание!

1. Перед выполнением работы получите инструктаж у лаборанта.
2. Запрещается трогать руками оптические поверхности линзы, источника и экран. Все перемещения вдоль оптической скамьи следует производить, двигая приборы за металлические рейтеры.
3. Соблюдайте общие правила техники безопасности работы в лаборатории «Физика».

Контрольные вопросы

1. Дайте определение дифракции.
2. Что такое волновая поверхность, фронт волны, луч?
3. Какие волны называются плоскими, сферическими?
4. Сформулируйте принцип Гюйгенса. Чему равна амплитуда вторичной сферической волны?
5. Чем отличается дифракция Френеля от дифракции Фраунгофера? Какой тип дифракции наблюдается в работе?
6. Как располагаются спектры для различных длин волн относительно друг друга?
7. Дайте определение дифракционной решётки, периода дифракционной решётки. Как связан период дифракционной решётки с числом штрихов на единицу длины?
8. Как получаются максимумы интенсивности от дифракционной решётки или нескольких щелей?
9. Как получаются минимумы и вторичные максимумы от дифракционной решётки? Под какими углами они возникают?
10. Сколько второстепенных минимумов располагается между двумя главными максимумами в спектре дифракционной решётки? От чего зависит интенсивность вторичных максимумов?

Лабораторная работа 17

ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА. ЗАКОН МАЛЮСА

Цель работы: 1) изучение явления поляризации света и ознакомление с методами получения плоскополяризованного света; 2) исследование зависимости интенсивности света, прошедшего через поляризатор, от угла между плоскостями поляризатора и анализатора – проверка закона Малюса.

Приборы и принадлежности: коммерческая лабораторная установка.

Методические указания и описание установки

Свет представляет собой поперечную электромагнитную волну. В однородных средах векторы напряжённостей электрического поля \mathbf{E} и магнитного поля \mathbf{H} колеблются во взаимно перпендикулярных плоскостях. Электромагнитное излучение, в котором направление электрического поля \mathbf{E} остаётся неизменным, называется *линейно-* или *плоскополяризованным излучением*, а плоскость, проведённая через направление вектора \mathbf{E} (его называют *световым вектором*) и направление распространения колебаний, называется *плоскостью колебаний*.

В излучении естественного источника направление электрического поля хаотически меняется, оставаясь, однако, перпендикулярным направлению распространения волны. Такое излучение называется *неполяризованным*.

Большинство источников испускает некогерентный неполяризованный свет. Неполяризованный свет можно поляризовать с помощью поляризационных приборов. Такие приборы называются *поляризаторами*. Плоскость, в которой они поляризуют проходящий через них свет, называется *плоскостью пропускания* данного поляризатора. Те же самые приспособления могут быть использованы для анализа степени и направления поляризации световой волны. В этом случае их называют *анализаторами*.

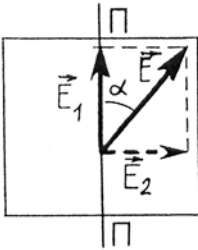


Рис. 1. Поляризатор

Если на поляризатор падает линейно поляризованный свет с вектором напряжённости \vec{E} , и плоскость колебаний составляет угол α с плоскостью поляризатора, то в волне, прошедшей через идеальный поляризатор, остаётся только компонент E_1 , параллельный плоскости поляризатора (рис. 1):

$$E_1 = E \cos \alpha, \quad E_2 = 0. \quad (1)$$

Поскольку интенсивность пропорциональна среднему квадрату напряжённости, то для интенсивности линейно поляризованного света, прошедшего через идеальный поляризатор, получаем соотношение, называемое законом Малюса:

$$I_1 = I \cos^2 \alpha. \quad (2)$$

При вращении поляризатора вокруг оси, совпадающей с направлением распространения света, его интенсивность не изменяется, и её среднее значение определяется средним значением $\cos^2 \alpha$, т.е. после прохождения поляризатора

$$I = I_{\text{прош}} = I_{\text{ест}} \frac{1}{2} = I_{\text{ест}} / 2. \quad (3)$$

При попадании на поляризатор частично поляризованного света закон Малюса подчиняется только поляризованная составляющая. С учётом (2) и (3) получим:

$$I_{\text{прош}} = \frac{I_{\text{ест}}}{2} \cos^2 \alpha.$$

При $\alpha = 0$ интенсивность максимальна, при $\alpha = \pi/2$ – минимальна:

$$I_{\text{max}} = I_{\text{ест}} / 2,$$

$$I_{\text{min}} = 0.$$

Поворачивая поляризатор вокруг продольной оси z и измеряя интенсивность прошедшего света, можно найти степень поляризации P падающего излучения:

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}. \quad (4)$$

Для плоскополяризованного света $I_{\min} = 0$ и $P = 1$, для естественного света $I_{\max} = I_{\min}$ и $P = 0$.

Поляризатор, используемый для анализа поляризации излучения, называют *анализатором*.

Лабораторная установка представляет собой заключённый в сдвигающийся светонепроницаемый кожух прибор (рис. 2), у которого есть рабочее (рис. 1, *a*) и настроечное положения (рис. 2, *б*).

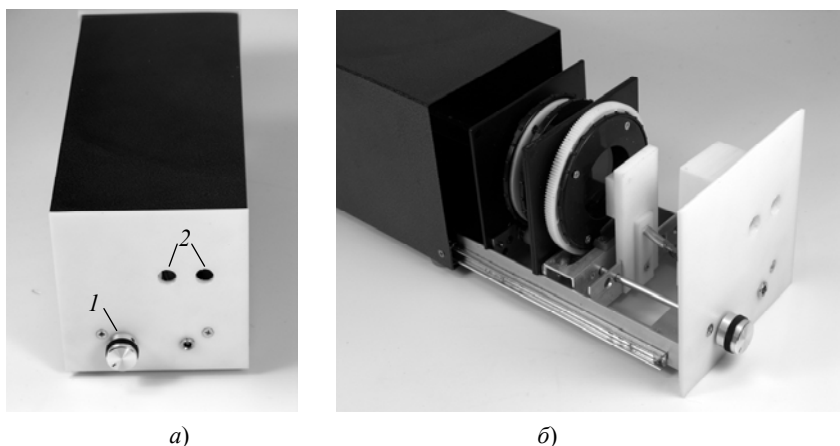


Рис. 2. Лабораторная установка

Прибор (рис. 3) содержит источник излучения 1 (светодиодная матрица), поляризационный блок 2 с механическим приводом вращения 3 , датчик угла поворота анализатора 4 , измерительное устройство 5 (фотометрический датчик).

К приборам и принадлежностям относятся также компьютер с необходимым программным обеспечением, концентратор для подключения датчиков к компьютеру, измерительные кабели.

Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

При выполнении работы к выходным разъёмам устройства 2 (рис. 2, *a*) необходимо подключить измерительные кабели датчиков, идущие к концентратору.

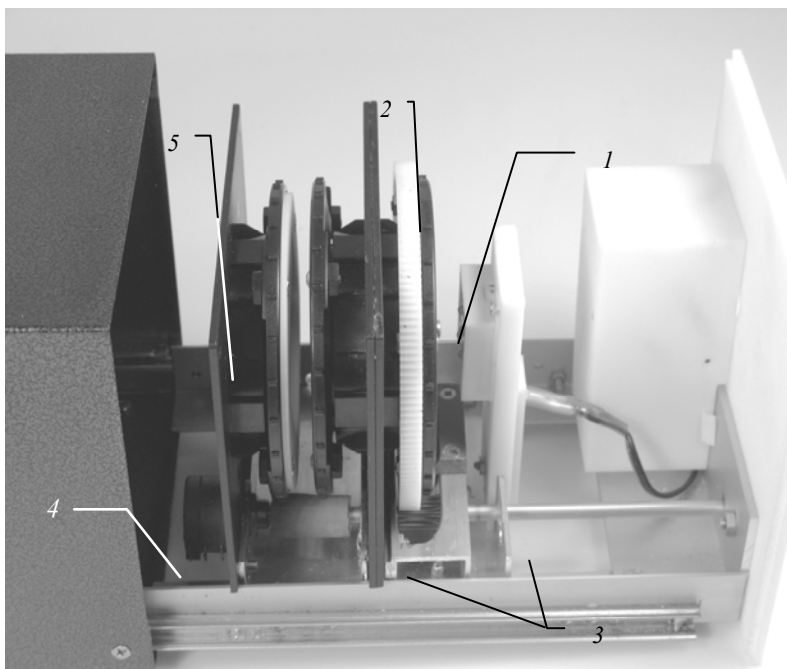



Рис. 3. Внутреннее расположение узлов установки

Напряжение питания осветителя – 12 В.

Поляризатор, преобразующий излучение светодиодной матрицы в поляризованный свет, установлен непосредственно за осветителем.


Вращение анализатора выполняется путём поворота ручки механического привода *1*, соосно с которой размещён датчик угла поворота анализатора.

1. Подключите датчик угла поворота и фотометрический датчик к обоим входам концентратора, присоединив последний к USB-входу компьютера.

2. После включения компьютера запустите программу «Практикум по физике». На панели устройств выберите соответствующий сценарий проведения эксперимента (Alt + C) .


3. Включите светодиодную матрицу-осветитель, вставив разъём сетевого адаптера в гнездо на передней панели прибора.

4. Установите анализатор в крайнее положение, вращая за рукоятку привода на лицевой панели установки.

5. Запустите измерения, выбрав на панели инструментов кнопку «Запустить измерения» (Ctrl + S) .

6. На экране появится окно «Обработка».

7. Проведите измерения. Изменяя угол ориентации поляризатора, сохраните значения интенсивности, нажимая на кнопку «дискета» после каждого изменения угла. Все данные будут записываться в таблицу.

8. По окончании эксперимента остановите измерения, нажав на кнопку (Ctrl + T) .

9. Выведите на экран график зависимости интенсивности от угла поворота анализатора, выбрав соответствующую кнопку в меню окна «Обработка».

10. Подберите начальное значение угла, соответствующее одинаковой ориентации поляризатора и анализатора (максимальное пропускание света). Введите исходные данные, перейдя в соответствующее окно.

11. Проведите аппроксимацию графика зависимости интенсивности от угла поворота квадратичной косинусной зависимостью: $\cos^2\alpha$.

12. Постройте график зависимости интенсивности от $\cos^2\alpha$ и проверьте её линейность.

13. Сделайте вывод о соответствии полученной зависимости закону Малюса.

Внимание!

1. Перед выполнением работы получите инструктаж у лаборанта.

2. Запрещается трогать руками оптические поверхности линзы, источника и экран. Все перемещения вдоль оптической скамьи следует производить, двигая приборы за металлические рейтеры.

3. Соблюдайте общие правила техники безопасности работы в лаборатории «Физика».

Контрольные вопросы

1. Какой свет называется естественным, плоскополяризованным, частично поляризованным?

2. Дать определение плоскости колебаний и плоскости поляризации, светового вектора.

3. Что такое поляризатор, анализатор?

4. Сформулируйте закон Малюса.

5. Что такое степень поляризации?

6. Что представляет собой свет? Расскажите о взаимной ориентации векторов напряжённостей электрического и магнитного полей.

7. Чему равна интенсивность прошедшей волны при падении на поляризатор плоскополяризованного света?
8. Чему равна интенсивность прошедшей волны при падении на поляризатор естественного света?
9. Чему равна интенсивность прошедшей волны при падении на поляризатор частично поляризованного света?
10. Чему равна степень поляризации естественного света? Плоскополяризованного?
11. Чему равны максимальная и минимальная интенсивности частично поляризованного света?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный в данном практикуме набор из 17 лабораторных работ проверен на практике в лаборатории «Электричество и магнетизм. Оптика» кафедры физики ФГБОУ ВПО «ТГТУ» в течение многих лет и отвечает программе курса общей физики в соответствии с Государственным стандартом для высших учебных заведений.

Количество работ и их тематика для выполнения конкретным студентом определяется учебным планом соответствующей специальности и формой обучения и может составлять от пяти до десяти работ за семестр. При этом в среднем на выполнение одной работы, обработку результатов измерений, защиту работы у преподавателя, ведущего занятия, отводится около трёх лабораторных часов.

Студенту следует обратить внимание на то, что предлагаемые измерительные приборы и методики работы с ними будут способствовать лучшему усвоению материала не только по курсу физики, но и по дисциплинам, изучаемым в последующих семестрах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Практикумы

1. **Лабораторный** практикум по физике / А. С. Ахматов и др. – Москва, 1980.
2. **Лабораторный** практикум по физике / В. А. Базакуца и др. – Харьков, 1964.
3. **Руководство** к лабораторным занятиям по физике / Л. Л. Гольдин и др. – Москва, 1973.
4. **Лабораторные** работы по физике / Г. И. Длужневский и др. – Москва, 1960.
5. **Физический** практикум. Электричество и оптика / В. И. Ивернова. – Москва, 1968.
6. **Практикум** по физике / А. В. Кортнев и др. – Москва, 1963.
7. **Практикум** по курсу общей физики / Н. Н. Майсова. – Москва, 1970.

Учебные пособия

1. **Барсуков, В. И.** Физика. Электричество и магнетизм : учебное пособие / В. И. Барсуков, О. С. Дмитриев. – Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2009. – 252 с.
2. **Барсуков, В. И.** Физика. Волновая и квантовая оптика : учебное пособие / В. И. Барсуков, О. С. Дмитриев. – Тамбов : ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 132 с.
3. **Детлаф, А. А.** Курс физики : учебное пособие для втузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – 4-е изд., испр. – Москва : Высшая школа, 2002. – 718 с.
4. **Зисман, Г. А.** Курс общей физики. Т. 2 / Г. А. Зисман, О. М. Тодес. – Москва : Наука, 1972.
5. **Савельев, И. В.** Курс общей физики : учебное пособие. В 3 т. Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика / И. В. Савельев. – 4-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Изд-во «Лань», 2005. – 496 с.
6. **Трофимова, Т. И.** Курс физики : учебное пособие для вузов. / Т. И. Трофимова. – 7-е изд., стер. – Москва : Высшая школа, 2001. – 541 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Лабораторная работа 1. Определение сопротивления с помощью мостика «Уитстона»	4
Лабораторная работа 2. Определение ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока методом компенсации	10
Лабораторная работа 3. Исследование закона Ома для участка цепи, содержащего ЭДС	17
Лабораторная работа 4. Изучение закона Ома для полной цепи, зависимости мощности и КПД источника тока от нагрузки	22
Лабораторная работа 5. Проверка правил Кирхгофа для разветвлённых цепей	25
Лабораторная работа 6. Определение горизонтальной составляющей вектора индукции магнитного поля Земли	30
Лабораторная работа 7. Определение удельного заряда электрона «методом магнетрона»	33
Лабораторная работа 8. Снятие кривой намагничивания железа по методу Столетова	40
Лабораторная работа 9. Снятие кривой намагничивания и петли гистерезиса с помощью осциллографа	45
Лабораторная работа 10. Изучение собственных электромагнитных колебаний в контуре	50
Лабораторная работа 11. Изучение вынужденных колебаний в последовательном колебательном контуре ...	59
Лабораторная работа 12. Определение радиуса кривизны линзы и длины световой волны с помощью колец Ньютона	65
Лабораторная работа 13. Изучение отражательной дифракционной решётки	70
Лабораторная работа 14. Определение концентрации сахара в растворе с помощью сахариметра	76
Лабораторная работа 15. Определение удельного заряда электрона	82
Лабораторная работа 16. Исследование дифракции Фраунгофера на дифракционной решётке	89
Лабораторная работа 17. Поляризация света. Закон Малюса	95
Заключение	101
Список литературы	102

Учебное издание

БАРСУКОВ Владимир Иванович
ДМИТРИЕВ Олег Сергеевич
ИВАНОВ Виталий Евгеньевич
ЛЯШЕНКО Юрий Петрович

ФИЗИКА

**ПОСТОЯННЫЙ ТОК, ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ,
ВОЛНОВАЯ ОПТИКА**

Практикум

Редактор И. В. Калистратова
Инженер по компьютерному макетированию М. Н. Рыжкова

ISBN 978-5-8265-1251-7



Подписано в печать 13.03.2014
Формат 60 × 84/16. 6,05 усл. печ. л.
Тираж 300 экз. Заказ № 120

Издательско-полиграфический центр
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
392000, Тамбов, ул. Советская, 106, к. 14
Тел./факс (4752) 63-81-08, 63-81-33
E-mail: izdatelstvo@admin.tstu.ru