

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ**  
**УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**  
**«ТУЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра физики

**Методические указания для проведения лабораторного практикума**  
**по дисциплине**

**"Физика"**

**семестр 3 (электромагнетизм)**

Для направлений подготовки:

01.03.02, 01.03.03, 04.03.01, 06.03.01, 08.03.01, 09.03.01, 09.03.02, 09.03.03, 09.03.04,  
10.03.01, 12.03.01, 12.03.02, 12.03.04, 13.03.02, 15.03.01, 15.03.02, 15.03.04, 15.03.05,  
15.03.06, 19.03.01, 20.03.01, 21.03.02, 22.03.01, 23.03.01, 23.03.02, 23.03.03, 24.03.02,  
24.03.03, 27.03.01, 27.03.02, 29.03.03, 49.03.01, 10.05.03, 11.05.01, 15.05.01, 17.05.01,  
17.05.02, 21.05.04, 23.05.01, 24.05.01, 24.05.02, 24.05.06

Методические указания подготовлены проф. Ю.Н. Колмаковым и доц. В.А.Семиным

Тула - 2022

## Оглавление

### ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

|   |    |
|---|----|
| Работа №21. Исследование электрического поля проводника с током.....                    | 4  |
| Работа №22. Измерение сопротивлений проводников мостовыми схемами.....                  | 6  |
| Работа №23. Релаксационные колебания.....   | 9  |
| Работа №24. Термоэлектрические явления.....   | 12 |
| Работа №25. Определение удельного заряда электрона методом магнетрона.....              | 15 |
| Работа №26. Магнитное поле Земли.....   | 18 |
| Работа №27. Исследование магнитного поля соленоида.....                                 | 21 |
| Работа №28. Определение индуктивности тороида с ферритовым магнитопроводом.....         | 24 |
| Работа №29. Исследование электрических затухающих колебаний с помощью осциллографа..... | 27 |
| Работа №30. Определение характеристик колебательного контура методом резонанса.....     | 30 |

## ВВЕДЕНИЕ

Рабочие программы предусматривают обязательное выполнение шести лабораторных работ по физике в течение 3-го семестра обучения. Эти работы выполняются по индивидуальному графику, имеющемуся в каждой лаборатории кафедры физики. Без выполнения шести работ и сдачи оформленного согласно приложенным образцам отчета по проделанным измерениям и полученным результатам студент не допускается к экзамену по физике.

Каждый сданный отчет по одной работе оценивается в 2 балла текущей аттестации. Студент имеет право ответить на вопросы и тесты, обосновывающие теорию и методику выполняемой работы. Успешная сдача такого теоретического минимума по каждой работе оценивается также в 2 балла текущей аттестации.

Далее приведены теоретические обоснования всех лабораторных работ, выполняемых в лабораторном практикуме кафедры физики ТулГУ по различным темам курса физики, изучаемым согласно рабочим программам. Изложены минимальные сведения, необходимые для защиты выполненных лабораторных работ и успешного ответа на контрольные вопросы. В каждой работе указан порядок выполнения экспериментальных измерений, их обработки и оформления отчетов.

## Работа №21. Исследование электрического поля проводника с током

**Цель работы:** изучение свойств электрических полей в проводящей жидкости, получение графического изображения поля с помощью эквипотенциальных поверхностей и силовых линий.

### Теоретическое описание

Пространство в кювете между двумя металлическими электродами (анодом и катодом) залито слабопроводящей жидкостью с малой удельной проводимостью  $\sigma$ . На электроды подано напряжение  $U = \phi_a - \phi_k = \mathcal{E} - Ir$ , и между ними возникает электрическое поле с напряженностью  $\vec{E}$  (рис.1). Линии напряженности  $\vec{E}$  (силовые линии поля) начинаются на положительно заряженном электроде (аноде) и заканчиваются на отрицательно заряженном катоде. Вдоль них, в жидкости протекает, электрический ток с плотностью  $\vec{j} = \sigma \vec{E}$ . Жидкость между проводниками является однородным проводником (в нём нет источников сторонней ЭДС). В таком случае поле  $\vec{E}$  является электростатическим потенциальным полем, создаваемым разностью потенциалов  $\Delta\phi$ .

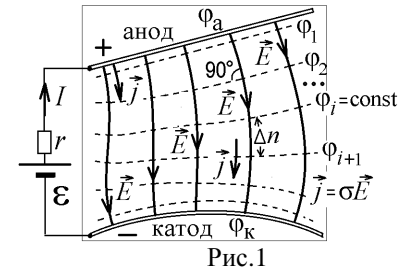


Рис.1

Напомним, что разность потенциалов определяет изменение потенциальной энергии заряда  $q$ , находящегося в электрическом поле:  $\Delta W = q\Delta\phi$ . Сила, действующая на положительный заряд единичной величины, будет напряженностью поля  $\vec{E} = \vec{F}/q = -\text{grad } W/q$ , а энергия такого заряда – потенциалом электрического поля  $\phi = W/q$ . Связь напряженности и потенциала  $\boxed{\vec{E} = -\text{grad } \phi}$ . Градиент любого скалярного потенциала  $\phi$  вычисляется по формуле

$\text{grad } \phi \equiv \vec{\nabla} \phi = \vec{i} \frac{\partial \phi}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial \phi}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial \phi}{\partial z}$ . Проекция вектора напряженности  $E_x = -\partial\phi/\partial x$ ;  $E_y = -\partial\phi/\partial y$ ;  $E_z = -\partial\phi/\partial z$ . Величина

напряженности  $E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$ .

Потенциальным называется поле, для которого в каждой точке однозначно определена величина потенциала  $\phi$ , и для которого можно определить потенциальную энергию  $E_{\text{пот}}$ . Силы, вызываемые такими полями консервативны, т.е. могут быть определены соотношением  $\vec{F} = -\text{grad } E_{\text{пот}}$ . Условие потенциальности электростатического поля выражается теоремой о циркуляции: циркуляция вектора напряженности электростатического поля по любому замкнутому контуру равна нулю:  $\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$  (рис.2).

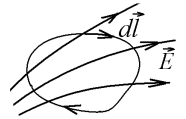


Рис.2

Линии  $\vec{E}$  потенциального электростатического поля начинаются и заканчиваются на электрических зарядах, или уходят в бесконечность. Они не могут образовать замкнутую линию.

Поверхности, во всех точках которых потенциал одинаков,  $\phi = \text{const}$ , называются эквипотенциальными поверхностями (на рис.1 они показаны штриховыми линиями). **Линии  $\vec{E}$  электростатического поля обязательно перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям**, и, как видно из рис.1, их надо рисовать изогнутыми, составляющими угол  $90^\circ$  с каждой поверхностью  $\phi = \text{const}$ . Вектор  $\text{grad } \phi$  направлен в сторону увеличения потенциала, а линии  $\vec{E}$  – в сторону уменьшения потенциала (рис.3). Чем гуще (плотнее) расположены линии  $\vec{E}$ , тем больше величина напряженности  $E$ .

Величину напряженности можно приближенно вычислить по формуле

$$E = \Delta\phi / \Delta n, \quad (1)$$

где  $\Delta\phi$  – разность потенциалов между двумя близко расположенными эквипотенциальными поверхностями, а  $\Delta n$  – расстояние между ними по нормали (рис.3). Этот отрезок совпадает с отрезком силовой

линии (на рис.1  $\Delta\phi = \phi_{i+1} - \phi_i$ ). Величина  $E$  различна в разных точках силовой линии и увеличивается, если линии  $\vec{E}$  сближаются друг к другу.

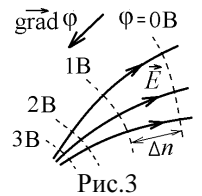


Рис.3

### Порядок выполнения работы

1. Перерисовать с установки **в натуральную величину** координатные линейки и электроды на листе миллиметровой бумаги, который в виде графика, который прилагается к отчету о выполнении работы.

2. Определить потенциал анода  $\phi_A$ , и записать его величину.

3. Найти эквипотенциальную поверхность со значением  $\phi_1 = 0,8\phi_A$ . Для этого следует поместить острие зонда в плоский сосуд с жидкостью над одной из вертикальных линий у миллиметровой бумаги, расположенной под прозрачным дном сосуда, и, перемещая его вдоль этой линии, найти координаты точки, в которой потенциал имеет значение  $\phi_1$ . Отметить эту точку на Вашем графике (рис.4). Помещая зонд последовательно над второй, над третьей и т.д. вертикальными линиями миллиметровой бумаги и перемещая зонд вдоль них, найти точки с тем же потенциалом  $\phi_1$ .

4. Соединив на своем рисунке точки с потенциалом  $\phi_1$ , вы получите первую из искомых эквипотенциальных поверхностей (на плоском листе она будет эквипотенциальной линией).

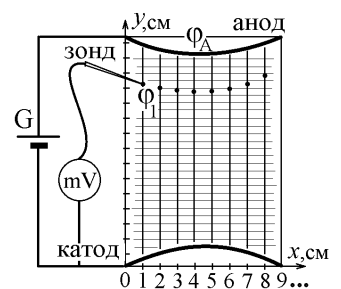


Рис.4

5. Аналогичные измерения проделать для других значений потенциалов, например,  $\varphi_2 = 0,6\varphi_A$ ,  $\varphi_3 = 0,5\varphi_A$ ,  $\varphi_4 = 0,4\varphi_A$ ,  $\varphi_5 = 0,2\varphi_A$ . Желательно выбрать их так, чтобы расстояния между эквипотенциальными линиями были приблизительно одинаковыми. На графике должно быть нарисовано не менее пяти эквипотенциальных линий.

6. Аккуратно, соблюдая взаимную ортогональность, нарисовать на бумаге систему силовых линий (не менее пяти), указав стрелками их направление, как показано на рис. 1.

7. Вычислить по формуле (1) значения напряженности  $E$  во всех точках пересечения одной из силовой линии с эквипотенциальной поверхностью.

#### Контрольные вопросы к лабораторной работе № 21

1. Какие поля называются потенциальными? Почему потенциально электростатическое поле и как записать условие его потенциальности?
2. Каков физический смысл потенциала? Разности потенциалов?
3. Как определяется и какой физический смысл имеет вектор напряженности  $\vec{E}$  электростатического поля? Как он связан с потенциалом?
4. Как вычислить градиент потенциала, его направление и его величину?
5. Найдите величину и направление вектора  $\vec{E}$  в точке на плоскости  $xu$ , в которой потенциал имеет выражение  $\varphi = Ax^n y^m$ , где  $A, n, m$  – целые числа (по указанию преподавателя).
6. Что такое эквипотенциальные поверхности? Какова взаимная ориентация плотности тока  $\vec{j}$ , текущего по электролиту, вектора  $\vec{E}$  и таких поверхностей?
7. Почему все силовые линии (линии  $\vec{E}$ ) электростатического поля в выполненной работе обычно не являются прямыми линиями?
8. Нарисуйте на листе бумаги картину из нескольких кривых линий, являющихся эквипотенциальными поверхностями, и объясните, как по этой картине рассчитать величину и направление вектора  $\vec{E}$ .
9. Три эквипотенциальные поверхности имеют на плоскости  $xu$  вид концентрических окружностей с центром в начале координат 0 (рис. А). Чему равна величина напряженности электрического поля в точке с координатами  $x = y = 3$  см?
10. Нарисуйте картину силовых линий и эквипотенциальных поверхностей для двух близко расположенных точечных зарядов, имеющих одинаковую величину и одинаковый (разный) знак.
11. Вблизи плоской границы металла, в воздухе, эквипотенциальные поверхности электрического поля искривлены и имеют величину потенциала, указанную на рис. Б. Укажите направление электрической силы, действующей на электрон, находящийся в точке 0.

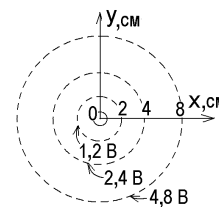


Рис. А

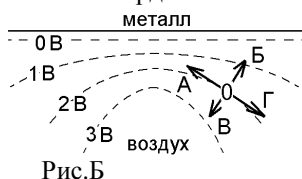


Рис. Б

#### Литература

1. Савельев И.В. Курс физики в 3-х тт.: Т. 2: Электричество - М.: Наука, 1970.- §§ 5, 7, 10-12.
2. Колмаков Ю. Н., Пекар Ю. А., Лагун И. М. Электричество и магнетизм,- изд. ТулГУ. 2008, гл. I §§ 1,2,6,7.

## Работа №22. Измерение сопротивлений проводников мостовыми схемами

**Цель работы:** ознакомление с принципами работы мостовых схем, определение удельного сопротивления с помощью моста Уитстона, определение сопротивления гальванометра с помощью моста Томсона.

### Теоретическое описание

Электрическая схема установки приведена на рис.5. Измерение удельного сопротивления участка провода длиной  $l_1$  с диаметром  $d$  не требует использования мостовой схемы. В этом случае ключи S1 и S2 разомкнуты, и провод напрямую подсоединен к источнику постоянной ЭДС  $\mathcal{E}$  (рис.6).

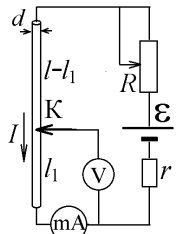


Рис.6

Измеряя ток  $I$ , текущий по участку провода  $l_1$ , длину которого меняют движком кронштейна К, а также падение напряжения  $U$  на нем (его можно менять с помощью движка реостата  $R$ ), находим сопротивление провода

$$R_2 = R_{\text{пр}} = U/I$$

(закон Ома). Это сопротивление связано с длиной провода  $l_1$  и с площадью поперечного сечения  $S = \pi d^2/4$ :  $R_{\text{пр}} = \rho l_1/S$ , откуда находим величину удельного сопротивления материала провода  $\rho = US/II_1$ .

Механизм возникновения электрического сопротивления можно объяснить качественно: свободные электроны в проводнике ускоряются электрическим полем, создающим ток, но не могут приобрести большую скорость, так как рассеиваются в стороны при взаимодействии с электрическими полями непрерывно колеблющихся атомов проводника (рис.7). Как видно, электроны движутся хаотически и смещаются против электрического поля  $\vec{E}$  с очень небольшой усредненной дрейфовой скоростью  $u < 1$  мм/с, создавая электрический ток с плотностью  $\vec{j} = -en\vec{u} = \vec{E}/\rho$ . Правильно такой процесс уравнениями классической физики описать нельзя. Рассеяние электронов на тепловых колебаниях атомов решетки подчиняется законам квантовой физики. Можно сказать, что величина удельного сопротивления  $\rho$  зависит от концентрации  $n$  свободных электронов и атомов, от конфигурации их электронных облаков, от ориентации и особенностей тепловых колебаний атомов среды, от температуры. Чем сильнее рассеяние свободных электронов, тем меньше их дрейфовая скорость  $\vec{u}$  направленного движения, тем больше электрическое сопротивление и меньше величина тока  $\vec{j}$ .

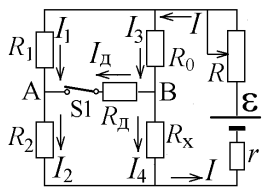


Рис.8

При замыкании ключа S2 схема на рис.5 образует мост Уитстона (рис.8). В данном случае правила Кирхгофа для разветвленной цепи имеют вид:

$$I = I_1 + I_3 = I_2 + I_4;$$

$$I_d = I_2 - I_1 = I_3 - I_4;$$

$$I_3 R_0 + I_d R_d - I_1 R_1 = 0;$$

$$I_4 R_x - I_2 R_2 - I_d R_d = 0;$$

$$I(R + r) + I_1 R_1 + I_2 R_2 = \mathcal{E}.$$

Здесь  $R_d$  – сопротивление диа-

гонали моста АВ,  $I_d$  – ток, текущий по этой диагонали через ключ S1. Направления токов указаны на рис.8.

Решите записанную систему уравнений и убедитесь, что по диагонали моста должен течь ток  $I_d = I \frac{R_x R_1 - R_0 R_2}{R_d (R_0 + R_x + R_1 + R_2) + (R_0 + R_1)(R_2 + R_x)}$ . Мост будет уравновешен, если этот ток равен нулю, т.е. при выполнении условия  $R_x R_1 = R_0 R_2$ . В этом случае  $I_3 = I_4$ ,  $I_1 = I_2$ , и при включении или выключении переключателя S1 показания вольтметра V на рис.5 не меняются.

Мостовая схема Уитстона позволяет определить неизвестное сопротивление  $R_x$ , уравновесив мост движком кронштейна К. Так как сопротивления участков провода пропорциональны их длине,  $R = \rho l/S$ , то, как видно из рис.5,  $R_x = R_0 l_1/(l - l_1)$ , где  $l$  – общая длина провода.

Такая мостовая схема позволяет достаточно точно измерить величину сопротивления  $R_x > 1$  Ом. Но при меньшем сопротивлении необходимо учитывать сопротивление соединительных проводов и, главным образом, сопротивление контакта в месте подсоединения соединительного провода с измеряемым сопротивлением, имеющим величину  $R_{\text{конт}} > 10^{-4}$  Ом. Поэтому малые сопротивления  $R_x < 0,1$  Ом припаивают к соединительным проводам не в одном, а в двух местах, используя для измерений мост Томсона, имеющий дополнительную диагональ  $R_3 - R_4$  (рис.9). Если этот мост уравновешен, то по диагонали АВ ток не течет ( $I_d = 0$ ).

В этом случае  $R_x = R_0 \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_3 R_5}{R_3 + R_4 + R_5} \left( \frac{R_2}{R_1} - \frac{R_4}{R_3} \right)$ .

Сопротивления  $R_3$  и  $R_4$  подбирают так, чтобы выполнялось условие  $R_2 R_3 = R_1 R_4$ . При этом

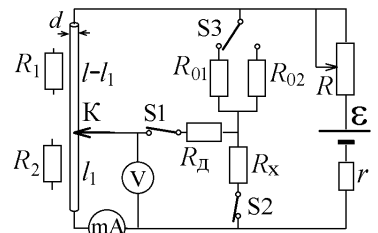


Рис.5

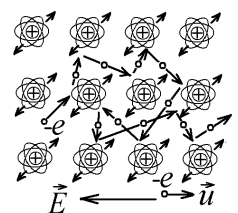


Рис.7

вклад сопротивлений двух контактов в месте подсоединения резисторов будет скомпенсирован и его можно не учитывать. При этом ток в сопротивлении  $R_5$  отсутствует. Проверить условие равновесия можно разрывая контакт цепи ключом S1 (рис.9). Токи в плечах моста не должны измениться. Заметим, что в этом случае  $R_x = R_0 R_2 / R_1$ , т.е. уравновешенный мост Томсона дает тот же результат, что и мост Уитстона, но позволяет измерить величину  $R_x$  значительно точнее.

#### Порядок выполнения работы

##### Описание установки

Общий вид установки представлен на рис.10. К основанию (1) прикреплена колонна (4) с нанесенной метрической шкалой (6). Подвижный кронштейн (5) может передвигаться вдоль колонны. Между верхним и нижним неподвижным кронштейнами натянут резистивный провод (3). Нажатие клавиши S прибора (2) вызывает включение напряжения питания, при этом высвечивается индикатор (7). Переключением клавиши S2 выбирается вид работы установки (мост Томсона или определение удельного сопротивления проводника).

Переключением клавиши S3 позволяет точно ток или напряжение при нижнем положении переключателя S1 и нажатой клавише S2. Клавиша S3 также служит для переключения резисторов  $R_0$  в мосту Томсона при отжатой клавише S2. Ручка резистора  $R$  позволяет регулировать силу тока в схеме.

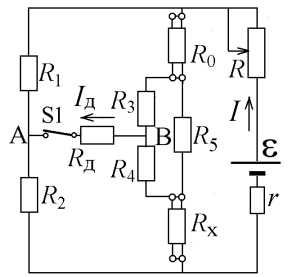


Рис.9

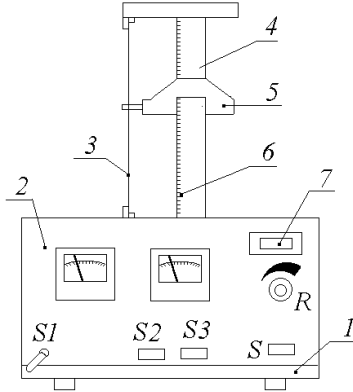


Рис.10

##### Определение удельного сопротивления резистивного провода.

Установите режим работы установки для определения удельного сопротивления проводника. Для этого необходимо произвести следующие операции с переключателями и клавишами:

1. Поставить переключатель S1 в нижнее положение.
2. Нажать клавишу S2 (положение V – mA).
3. Клавиша S3 в нажатом положении. При таком положении переключателей и клавиш включена схема, изображенная на рис.6.
4. Включите вилку провода от установки в розетку напряжением 220 В. Нажмите клавишу S (сеть).
5. Передвиньте подвижный кронштейн на колонне на 35 см от основания (необходимо определить положение риски на подвижном кронштейне по шкале на колонне). Регулятором тока R установите такое значение тока, чтобы вольтметр показывал приблизительно 2/3 измерительного диапазона.
6. Запишите показания амперметра и вольтметра в таблицу 1.
7. Значение напряжения и тока измерьте для трех различных длин проводника.
8. Вычислите удельное сопротивление проводника по формуле  $\rho = US / Il$ , где  $U$  – напряжение на проводнике;  $I$  – ток в проводнике;  $l$  – длина проводника;  $S$  – площадь его поперечного сечения для трёх проведенных измерений. Данные занести в таблицу 1.

Таблица 1.

| № п/п | $U$ , В | $I$ , $10^{-3}$ А | $l$ , м | $S$ , $m^2$ | $\rho_i$ , Ом·м | $\langle \rho \rangle$ , Ом·м | $\Delta \rho_i$ , Ом·м | $\langle \rho \rangle$ , Ом·м | $\Delta \rho$ , Ом·м | $E$ % |
|-------|---------|-------------------|---------|-------------|-----------------|-------------------------------|------------------------|-------------------------------|----------------------|-------|
|       |         |                   |         |             |                 |                               |                        |                               |                      |       |
|       |         |                   |         |             |                 |                               |                        |                               |                      |       |
|       |         |                   |         |             |                 |                               |                        |                               |                      |       |

9. Рассчитайте среднее значение удельного сопротивления  $\langle \rho \rangle$ .

10. Определите случайные отклонения  $\Delta \rho_i = \rho_i - \langle \rho \rangle$  для каждого измерения  $i = 1, 2, 3$  и среднее квадратичное

отклонение  $S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (\Delta \rho_i)^2}$ . Вычислите погрешность  $\Delta \rho$  результата измерений:  $\Delta \rho = S / \sqrt{3}$ , а также относительную погрешность  $E = \frac{\Delta \rho}{\langle \rho \rangle} \cdot 100\%$ . Результаты вычислений занести в таблицу 1.

11. Записать результат в виде:  $\rho = (\langle \rho \rangle \pm \Delta \rho)$  Ом·м:  $\rho = (\dots \pm \dots)$  Ом·м

##### Определение сопротивления гальванометра с помощью моста Томсона.

1. Схема моста Томсона показана на рис.9. Для включения такой схемы необходимо отжать клавишу S2 (положение – мост)
2. Переключатель S1, разрывающий диагональ моста, поставьте в нижнее положение; отожмите клавишу S3, при этом в плечо моста подключается первый резистор  $R_{01}$ .
3. Регулятором  $R$  (рис.10) установите стрелку вольтметра так, чтобы она не зашкаливала.
4. Поставьте переключатель S1 в верхнее положение, при этом показание вольтметра изменится; передвигая по проводу подвижный кронштейн 5 (рис.10), добейтесь первоначального показания вольтметра (как и при нижнем положении переключателя S1), т.е. уравновесьте мост.
5. Проверьте равновесие моста переводом переключателя S1 в нижнее и вновь в верхнее положение. Стрелка вольтметра при этом не должна изменять своего положения.

6. Запишите значение сопротивления подключенного резистора  $R_{01}$  и длину проводника  $l_1$  от основания до рис-ки на подвижном кронштейне в таблицу 2.

7. Верните переключатель S1 в нижнее положение, разрывая диагональ моста. Нажмите клавишу S3, тем самым подключая в плечо моста второй резистор  $R_{02}$ . Переведите переключатель S1 в верхнее положение, замыкая диагональ моста. Показание вольтметра изменится. Снова уравновесьте мост передвиганием подвижного кронштейна. Проверьте равновесие моста переводом переключателя S1 в нижнее и вновь в верхнее положение. Стрелка вольтметра при этом не должна изменять своего положения.

8. Запишите значение сопротивления подключенного резистора  $R_{02}$  и новую длину проводника  $l_1$  от основания до рис-ки на подвижном кронштейне в таблицу 2.

9. Повторите пункты 2–8 при двух других значениях напряжения, изменяя его регулятором R.

10. Сопротивление гальванометра вычислите по формуле  $R_x = R_0 \frac{l_1}{l - l_1}$ , где  $l = 51$  см – длина всего провода.

9. Рассчитайте среднее значение сопротивления  $\langle R_x \rangle$ .

11. Определить случайные отклонения  $\Delta R_{xi} = R_{xi} - \langle R_x \rangle$  для каждого измерения  $i = 1 - 6$  и среднее квадратичное отклонение  $S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (\Delta R_{xi})^2}$ . Вычислите погрешность  $\Delta R_x$  результата измерений:  $\Delta R_x = S/\sqrt{6}$ , а также относительную погрешность  $E = \frac{\Delta R_x}{\langle R_x \rangle} \cdot 100\%$ . Результаты вычислений занести в таблицу 1.

11. Записать результат в виде:  $R_x = (\langle R_x \rangle \pm \Delta R_x)$  Ом·м:

$R_x = (\dots \pm \dots)$  Ом·м

Измерения и окончательный результат занесите в таблицу 2

Таблица 2.

| № п/п | $R_0$ , Ом | $l_1$ , см | $R_{xi}$ , Ом | $\langle R_x \rangle$ , Ом | $\Delta R_{xi}$ , Ом | $\Delta R_x$ , Ом | E, % |
|-------|------------|------------|---------------|----------------------------|----------------------|-------------------|------|
|       |            |            |               |                            |                      |                   |      |
|       |            |            |               |                            |                      |                   |      |
|       |            |            |               |                            |                      |                   |      |
|       |            |            |               |                            |                      |                   |      |
|       |            |            |               |                            |                      |                   |      |
|       |            |            |               |                            |                      |                   |      |

### Контрольные вопросы к лабораторной работе № 22

1. Объясните механизм появления электрического тока в металлах. Как движутся свободные электроны в металлическом проводнике, подключенном к источнику напряжения? Почему мала скорость их направленного движения?

2. По какой причине возникает электрическое сопротивление? Какую величину называют удельным сопротивлением? От чего она зависит?

3. Как вычислить сопротивление однородного участка проводника, зная его размеры?

4. Сформулируйте закон Ома для однородного участка проводника в обычной и в локальной форме.

5. Проволока подключена к источнику постоянной ЭДС  $\varepsilon$  с внутренним сопротивлением  $r$ . Длину  $l$  проволоки увеличили в 4 раза. Как надо изменить диаметр  $d$  проволоки, чтобы текущий по проволоке ток не изменился?

6. Сформулируйте правила Кирхгофа. Объясните, как ими пользоваться.

7. Запишите систему уравнений правил Кирхгофа для определения токов в неуравновешенной мостовой схеме, изображенной на рис.А.

8. Сделайте вывод условия равновесия мостовой схемы.

9. Чем отличаются мостовые схемы Уитстона и Томсона? В каких случаях они применяются? Можно ли использовать схему Томсона вместо схемы Уитстона?

10. Определите величину и направление тока, протекающего через сопротивление  $R$  на рис.Б, где  $\varepsilon_1 = 10$  В,  $\varepsilon_2 = 5$  В,  $R = 10$  Ом, а внутренние сопротивления обоих источников ЭДС равны  $r = 1$  Ом.

11. Запишите систему уравнений (правил Кирхгофа) для определения токов, протекающих в разветвленной цепи, изображенной на рис.В.

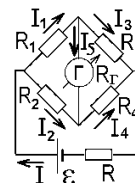
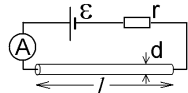


Рис.А

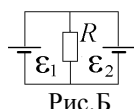


Рис.Б

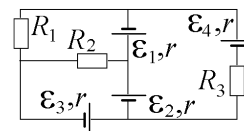


Рис.В

### Литература

1. Савельев И.В. Курс физики в 3-х тт.: Т. 2: Электричество - М.: Наука, 1970.- §§ 31-33, 35,36.
2. Колмаков Ю. Н., Пекар Ю. А., Лагун И. М. Электричество и магнетизм,- изд. ТулГУ. 2008, гл.5 §§ 1-7.



## Работа №23. Релаксационные колебания

Цель работы: исследование характера релаксационных колебаний в схеме с газоразрядной лампой и определение их параметров.

### Теоретическое описание

Газоразрядная лампа, изображенная на рис.11, заполнена неонем. При среднем положении ключа К к ней подключен реостат с общим сопротивлением  $R$ , по которому течет ток  $I_1 = \varepsilon / (R + r)$ , созданный источником постоянной ЭДС. На лампу подается напряжение  $U$  с части реостата, имеющей сопротивление  $R_1$  (рис.11). Передвигая движок реостата вправо, увеличиваем величину сопротивления  $R_1$  и напряжения  $U = I_1 R_1$ . Нейтральный газ – достаточно хороший диэлектрик, и ток в лампе практически отсутствует.

Но когда напряжение  $U$  достигает большой величины, работа по ускорению электрона, вылетевшего с анода, превышает энергию ионизации атома неона,  $A = eU > E_{\text{ионизации}}$ . Налетающий электрон выбивает электрон из атома. Далее два электрона ускоряются, выбивают еще два электрона и т.п. Число электронов, попадающих на анод, и ионов, перемещающихся к катоду, растет лавинообразно (рис.12). Поэтому резко растет ток  $I$ , протекающий через лампу и резко уменьшается её сопротивление  $R_{\text{л}} = U / I$ . Лампа “зажигается”. Помимо ионизации происходит процесс возбуждения атомов, которые начинают испускать световые фотоны. Газ светится.

Если теперь уменьшать напряжение  $U$ , то в какой-то момент энергии электронов не хватает для ионизации, и лампа “гаснет”. Зажечь лампу всегда труднее: необходима большая энергия для вылета электрона из холодного катода, и необходимо создать в лампе большое число свободных электронов и ионов. В “горящей” лампе их много, катод нагрет большим током  $I$ , и поэтому

напряжение зажигания  $U_3$  всегда больше напряжения гашения  $U_{\text{г}}$ .

Ключом К подключим в цепь конденсатор с ёмкостью  $C$ . Если лампа не горит, то её сопротивление  $R_{\text{л}} \gg R_1$ . Конденсатор начинает заряжаться. Пусть конденсатор подсоединен к источнику ЭДС через сопротивление  $R$  (рис.13,а). Правило Кирхгофа для этого контура  $U_C + IR = \varepsilon$ . Подставляем  $I = dq/dt$ ,

$U_C = q/C$ , разделяем переменные и интегрируем полученное уравнение

$\int_0^q \frac{dq}{q - \varepsilon C} = -\frac{1}{RC} \int_0^t dt$ , что даёт  $\ln\left(\frac{\varepsilon C - q}{\varepsilon C}\right) = -\frac{t}{RC}$ . Отсюда следует, что заряд и напряже-

ние на конденсаторе растут со временем экспоненциально:  $q(t) = CU_C(t) = \varepsilon C(1 - \exp(-t/RC))$ .

Наша схема включения конденсатора более сложна (рис.13,б). Правила Кирхгофа для неё имеют вид

$$\begin{cases} I + I_1 = I_2; \\ I_2(R - R_1 + r) + U_C = \varepsilon; \\ U_C - I_1 R_1 = 0. \end{cases}$$

Исключая токи  $I_1$  и  $I_2$ , приходим к уравнению  $I = \frac{dq}{dt} = \alpha - \beta q$ , где  $\alpha = \frac{\varepsilon}{R - R_1 + r}$ ,  $\beta = \frac{R + r}{CR_1(R - R_1 + r)}$ .

Как и раньше, разделяем переменные и интегрируем,  $\int \frac{dq}{\alpha - \beta q} = \int dt$  (\*),

получая закон увеличения падения напряжения при зарядке конденсатора с течением времени  $U_C = \frac{q}{C} = \frac{\varepsilon R_1}{R + r}(1 - \exp(-t/\beta))$ .

Когда напряжение  $U_C$  достигает величины напряжения зажигания лампы  $U_3$ , лампа зажигается. А так как её сопротивление  $R_{\text{л}}$  очень мало, то конденсатор начинает разряжаться через лампу (рис.13,в). Правило Кирхгофа

$U_C + IR_{\text{л}} = 0$  даёт  $\frac{q}{C} = -R_{\text{л}} \frac{dq}{dt}$ . Интегрируя,  $\int \frac{dq}{q} = -\int \frac{dt}{R_{\text{л}} C}$ , получаем закон разряда конденсатора:

$$q(t) = CU_C(t) = q_0 \exp(-t/R_{\text{л}} C).$$

При разряде падение напряжения на лампе уменьшается, достигает напряжения гашения  $U_{\text{г}}$ , лампа гаснет, и конденсатор снова начинает заряжаться от источника ЭДС. Возникают автоколебания – незатухающие колебания, для поддержания которых не требуется прилагать внешнее колебательное воздействие – лампа то загорается, то гаснет, а напряжение на конденсаторе периодически меняется в пределах  $U_{\text{г}} \leq U_C \leq U_3$ , как показано на рис.14.

Из-за малого сопротивления зажжённой лампы  $R_{\text{л}} \ll R_1$  разряд конденсатора через неё происходит очень быстро (лампа мигает короткими вспышками). Можно считать, что период колебаний  $T$  равен времени, за которое конденсатор заряжается от напряжения  $U_{\text{г}}$  до напряжения  $U_3$ .

*Вывод расчетной формулы.* Чтобы найти величину  $T$ , сделайте в записанном выше

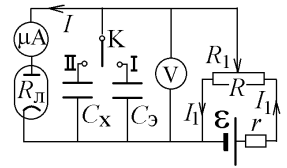


Рис.11

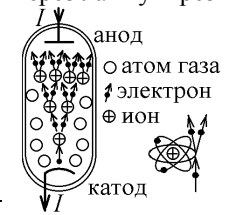


Рис.12

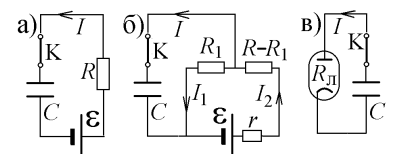


Рис.13

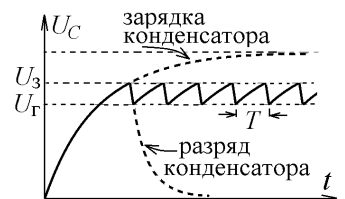


Рис.14

уравнении (\*) замену  $q = U_C C$ , и преобразуйте его к виду  $\int_{U_\Gamma}^{U_3} \frac{dU_C}{U_C - (\alpha / C\beta)} = -\beta \int_0^T dt$ . Вычисляя интеграл, получите  $T = -\frac{1}{\beta} \ln \left( \frac{1 - C\beta U_3 / \alpha}{1 - C\beta U_\Gamma / \alpha} \right)$ . Учтите, что  $\frac{C\beta U_3}{\alpha} = \frac{(R+r)U_3}{R_1 \mathcal{E}} \ll 1$ , так как в используемой установке величина ЭДС  $\mathcal{E} \gg U_3$ . Так как

$$\ln(1+x) \approx x \text{ при } x \ll 1, \text{ полученный результат принимает вид } T = \frac{C}{\alpha} (U_3 - U_\Gamma) = \frac{C(R - R_1 + r)}{\mathcal{E}} (U_3 - U_\Gamma).$$

При неизменном положении движка реостата  $R_1$  период мигания лампы будет пропорционален ёмкости подсоединенного конденсатора,  $T \sim C$ . Подсоединя тумблером К (рис.11) то эталонный конденсатор с ёмкостью  $C_3$ , то исследуемый конденсатор, можно, измерив периоды мигания лампы, вычислить его неизвестную ёмкость

$$C_x = C_3 T_x / T_3. \quad (2)$$

#### Порядок выполнения работы

##### А. Построение вольт-амперной характеристики неоновой лампы.

1. Разберитесь в назначении элементов схемы (рис.15).
2. Регуляторы R1 и R2 поверните до упора против часовой стрелки, переключатель S1 установите в нейтральное положение.
3. Включите установку в сеть.
4. Медленно увеличивая напряжение с помощью потенциометра R1, заметьте момент зажигания лампы (стрелка микроамперметра резко отклонится от нуля). Вольтметр покажет напряжение зажигания  $U_3$  (кнопку S2 в процессе измерений держать замкнутой).
5. Продолжая увеличивать напряжение  $U$ , и через равные интервалы его изменения, измеряемого вольтметром V, измеряйте ток, текущий через лампу.
6. После достижения максимально возможного напряжения начните уменьшать его до полного гашения лампы ( $U_\Gamma$ ), также записывая значения тока.
7. Данные занесите в таблицу 1.
8. По данным таблицы 1 на одном поле постройте два графика зависимости тока в лампе от напряжения  $I = f(U)$  (при увеличении и при уменьшении  $U$ ).

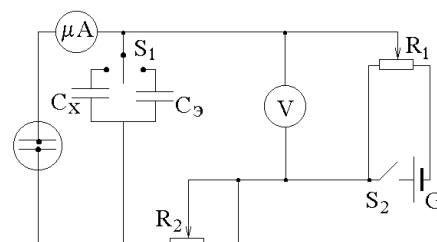


Рис.15

Таблица 1.

| При увеличении напряжения |        | При уменьшении напряжения |        |
|---------------------------|--------|---------------------------|--------|
| U, В                      | I, мкА | U, В                      | I, мкА |
|                           |        |                           |        |
|                           |        |                           |        |
|                           |        |                           |        |
|                           |        |                           |        |
|                           |        |                           |        |
|                           |        |                           |        |
|                           |        |                           |        |
|                           |        |                           |        |
|                           |        |                           |        |
|                           |        |                           |        |
|                           |        |                           |        |

##### Б. Определение величины неизвестной ёмкости.

1. Переключатель S1 поставьте в положение  $C_3$  (в цепь включается эталонный конденсатор, ёмкость которого  $C_3$  приведена на установке). Ручку R2 поверните до упора против часовой стрелки.
2. Очень медленно увеличивая напряжение, добейтесь возникновения колебаний с как можно меньшей частотой, наблюдаемых по миганию неоновой лампочки. Измерьте время  $t_3$   $n = 10$  миганий лампочки. По формуле  $T_3 = t_3 / 10$  рассчитайте период колебаний.
3. Не трогая остальные регуляторы R1 и R2, переключателем S1 включите в цепь конденсатор неизвестной ёмкости  $C_x$ . Измерьте время  $t_x$   $n = 10$  миганий лампочки и определите период колебаний  $T_x = t_x / 10$ .
4. Согласно формуле (2) найдите неизвестную ёмкость  $C_x$ .
5. Результаты занесите в таблицу 2.

Таблица 2.

| $t_3, c$ | $t_x, c$ | $T_3, c$ | $T_x, c$ | $C_3, мкФ$ | $C_x, мкФ$ |
|----------|----------|----------|----------|------------|------------|
|          |          |          |          |            |            |

#### Контрольные вопросы к лабораторной работе № 23

1. Первоначально конденсатор с ёмкостью  $C$  в изображенной на рис.А цепи был не заряжен. Ключ К замкнули, подсоединя конденсатор к источнику постоянной ЭДС  $\mathcal{E}$  через сопротивление  $R$ . Используя правило Кирхгофа, запишите уравнение зарядки конденсатора, решите его, находя зависимость напряжения на обкладках конденсатора  $U_C$  от времени  $t$ . Нарисуйте график зависимости  $U_C = U_C(t)$ .
2. Конденсатор с ёмкостью  $C$  в изображенной на рис.Б цепи имел заряд  $q_0$ . Ключ К замкнули. Используя правило Кирхгофа, вычислите закон изменения заряда на конденсаторе от времени и нарисуйте график зависимости  $q = q(t)$ .
3. Какую роль играет в данной работе заполненная неоном лампочка? Почему в момент зажигания она начинает светиться? Как изменяются параметры цепи в момент зажигания и в момент гашения лампочки? Как процесс ионизации газа в лампочке влияет на протекающий через неё ток? Как меняется сопротивление лампы при её зажигании и гашении?
4. Почему при замыкании ключа К на рис.11 лампочка начинает мигать? Что при этом происходит с напряжением на обкладках конденсатора? Какая величина испытывает релаксационные колебания, и по какой причине?

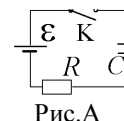


Рис.А

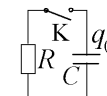


Рис.Б

5. Почему напряжение зажигания  $U_3$  газонаполненной лампы больше, чем напряжение её гашения  $U_{\Gamma}$ ? Почему при обратном соотношении  $U_{\Gamma} > U_3$  релаксационные колебания возникнуть не могут?
6. В электрической цепи для изучения релаксационных колебаний конденсатор ёмкостью  $C_1 = 3600$  пФ заменяют конденсатором с ёмкостью  $C_2 = 900$  пФ. Что произойдет при этом с периодом релаксационных колебаний?
7. Сделайте вывод расчетной формулы  $C_x = C_3 T_x / T_3$ .

#### Литература

1. Савельев И.В. Курс физики в 3-х тт.: Т. 2: Электричество - М.: Наука, 1970.- §§ 24,25, 33, 35, 36, 84-88.
2. Колмаков Ю. Н., Пекар Ю. А., Лагун И. М. Электричество и магнетизм,- изд. ТулГУ. 2008, гл.4 §§1,2, гл.5 §§1,5-7.

## Работа №24. Термоэлектрические явления

**Цель работы:** ознакомление с термоэлектрическими явлениями, градуировка термопары и определение удельной термоэлектродвижущей силы.

### Теоретическое описание

Исследуемая в работе **термопара** – это замкнутая цепь из проводников, изготовленных из **разных** металлов (рис.16). Если контакты (спай) проводников поддерживать при разных температурах  $T_1 \neq T_2$ , то в цепи возникает термоЭДС  $\mathcal{E}_{\text{термо}}$  и протекает термоэлектрический ток  $\vec{j}$ . Это – **эффект Зеебека**. Величина термоЭДС пропорциональна разности температур:  $\mathcal{E}_{\text{термо}} = \alpha(T)(T_1 - T_2)$ , где  $\alpha(T)$  – коэффициент, называемый **удельной термоЭДС** – это величина термоЭДС при разности температур двух спаев в  $\Delta T = 1 \text{ К}$ .

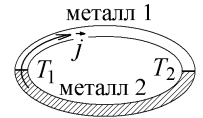


Рис.16

**Вывод расчетной формулы.** Получить зависимость  $\mathcal{E}_{\text{термо}}$  от разности температур  $T_1 - T_2$  достаточно просто, если считать газ свободных электронов в металле идеальным газом. Весь перешедший из одного металла в другой заряд, т.е. перешедшие электроны могут распределиться только по поверхности металла. Внутри объема плотность заряда остается равной нулю и концентрации электронов  $n_1$  и  $n_2$  не меняются. При появлении термоэлектрического тока через спай I, нагретый до температуры  $T_1$  за какое-то время переносится заряд  $-eN$ , т.е.  $N$  электронов, занимавших в металле 1 объем  $V_1 = N/n_1$  переходят в металл 2, где занимают объем  $V_2 = N/n_2$  (рис.17). Происходит изотермическое изменение объема электронного газа. Работа, совершаемая над газом при изотермическом процессе  $A_1 = \nu RT_1 \ln(V_2/V_1) = Nk_B T_1 \ln(n_1/n_2)$ , где  $k_B$  – постоянная Больцмана. При переходе такого же числа электронов через второй спай II при температуре  $T_2$  будет совершена работа  $A_2 = Nk_B T_2 \ln(n_2/n_1)$ . Суммарная работа над электронным газом будет работой термоЭДС (по определению ЭДС  $\mathcal{E}$  равна работе, совершаемой над положительным зарядом единичной величины):  $eN\mathcal{E}_{\text{термо}} = A_1 + A_2 = Nk_B(T_1 - T_2) \ln(n_1/n_2)$ . Отсюда



Рис.17

$$\mathcal{E}_{\text{термо}} = \frac{k_B}{e} \ln\left(\frac{n_1}{n_2}\right) \cdot (T_1 - T_2) = \alpha(T) \cdot (T_1 - T_2), \text{ где } e - \text{величина заряда электрона.}$$

В действительности полученная формула дает лишь **качественное** объяснение зависимости термоЭДС от температур спаев термопары. Электронный газ в металле не является классическим газом, подчиняющимся распределению Максвелла-Больцмана. Правильное объяснение контактных термоэлектрических явлений может быть получено только в квантовой теории.

На поверхности любого металла образуется двойной электрический слой, связанный с тем, что распределение плотности свободных электронов не совпадает с распределением плотности положительных ионов. Толщина этого слоя  $d$  не превышает нескольких межатомных расстояний, и внутри слоя возникает электрическое поле с напряженностью  $\vec{E}_{\text{сл}}$ , препятствующее вылету свободных электронов с зарядом  $-e$  из металла (рис.18). Чтобы электрон хотя бы с нулевой скоростью покинул металл, ему надо преодолеть запирающее поле, совершив работу  $A_{\text{вых}} = eE_{\text{сл}} \cdot d$ . Такая минимальная энергия, которую надо сообщить электрону, для вылета, называется **работой выхода электрона из металла**. Энергия электрона  $E_M$  внутри металла меньше энергии электрона  $E_B$  вне металла, в вакууме, на величину работы выхода:  $A_{\text{вых}} = E_B - E_M$ .

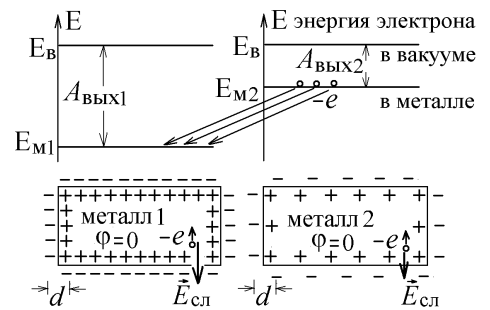


Рис.18

Концентрации  $n_1$  и  $n_2$  электронов и величины работы выхода  $A_1$  и  $A_2$  в разных металлах различны, причем оба металла на рис.18 не заряжены и имеют одинаковый потенциал. Если их соединить (спаять), то энергии электронного газа в общем проводнике выравниваются из-за того, что электроны будут переходить из металла с меньшей работой выхода, где их энергия больше, в металл с большей работой выхода, заряжая металл с большей работой выхода отрицательно, а металл с меньшей работой выхода – положительно (рис.18). Электроны переносят заряд, который распределяется по поверхности металлов, в том числе по поверхности их соприкосновения (спая, рис.19).



Рис.19

Внутри объема плотность заряда остается равной нулю, и концентрации электронов  $n_1$  и  $n_2$  не меняются. Если первоначально потенциал обоих металлов был равен нулю, то теперь они приобретают потенциалы  $\Phi_1 < \Phi_2$  и между ними создается контактная разность потенциалов, пропорциональная разности работ выхода:  $\Delta\Phi = \Phi_1 - \Phi_2 = (A_{\text{вых1}} - A_{\text{вых2}})/e$ , которую **называют внешней контактной разностью потенциалов**.

Если два спая термопары имеют одинаковую температуру, то в замкнутой цепи контактные разности потенциалов, играющие роль ЭДС, уравновешивают друг друга, и ток в термопаре отсутствует (рис.20,а). Если температуры спаев

разные, то имеется три причины возникновения термоЭДС.

1) Величина работы выхода слабо зависит от температуры металла. Величина разности работ выхода растет с ростом температуры, и контактные разности потенциалов спаев, нагретых до разных температур, различны (рис.20,б). В цепи возникнет эффективная ЭДС  $\varepsilon = \Delta\phi_1(T_1) - \Delta\phi_2(T_2)$ , пропорциональная разности температур спаев и создающая ток проводимости  $\vec{j}_{\text{пров}}$ .

2) При нагревании металла возрастает концентрация свободных электронов, способных направленно перемещаться по проводнику и создавать ток. Диффузионные потоки  $\vec{j}_{\text{дифф}}$ , стремящиеся выровнять концентрацию таких электронов по разные стороны спая, растут с ростом температуры и не будут скомпенсированы при разных температурах спаев (рис.21), приводя к накоплению заряда. Чтобы этот заряд вблизи контактов цепи не рос, возникает ток проводимости с плотностью  $\vec{j}_{\text{пров}}$ , направление которого показано на рис.21 (так как электроны заряжены отрицательно, то ток  $\vec{j}_{\text{пров}}$  перемещает их в направлении, обратном направлению диффузионного потока  $\vec{j}_{\text{дифф}}$ ).

3) Колебания атомов решетки металла представляют в виде газа квазичастиц-фононов, на которых рассеиваются движущиеся в металле электроны. Поток фононов, пропорциональный градиенту температуры и направленный к холодному спаю увлекает электроны за собой. Это приводит к увеличению термоэлектрического тока.

Все эти механизмы возникновения явления термоэлектричества могут быть правильно описаны только в квантовой теории металлов. Их суммарное действие приводит к появлению достаточно большой термоЭДС. Так удельная термоЭДС пары Pd-Ag равна 86 мкВ/К. Термопары используются, например, в качестве источника тока в геотермальных электростанциях, или для подзарядки аккумуляторов подводных лодок.

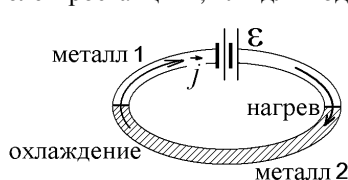


Рис.22

Обратным явлением Зеебека будет эффект Пельтье: если в замкнутую цепь из двух разнородных проводников включить внешний источник ЭДС (рис.22), то вызванный этим источником ток охлаждает один из контактов между проводниками и нагревает другой (в зависимости от направления тока и характеристик металлов). В рассмотренном выше случае металл 2 заряжен положительно, а металл 1 – отрицательно (рис.19). Переходя из металла 1 в металл 2, электроны будут уменьшать энергию взаимодействия с электрическим полем на величину  $e\Delta\phi$ , отдавая её области вблизи спая и нагревая её (рис.22). По той же причине переходя обратно в металл 1, электрон забирает эту энергию, охлаждая второй спай.

#### Порядок выполнения работы

1. Определите по термометру “тер” на установке (рис.23) комнатную температуру  $t_{\text{комн}}$ , одинаковую для спаев а, б и с при выключенном нагревателе R.

2. Включите установку в сеть. Нагревая рабочий спай термопары, через каждые 5°C измеряйте по вольтметру величину термоЭДС  $\varepsilon'_T$ . Нагревание производите до 80°C. Результаты измерений занесите в таблицу.

3. При достижении 80°C выключите установку и продолжите измерение термоЭДС  $\varepsilon''_T$  при естественном остывании рабочего спая, фиксируя её значение при тех же значениях температуры, какие были взяты при нагревании, но в обратном порядке вплоть до комнатной температуры. Данные занесите в таблицу.

4. Для каждого значения температуры вычислите среднее значение термоЭДС

$\varepsilon_T = \frac{1}{2}(\varepsilon'_T + \varepsilon''_T)$  и постройте график зависимости  $\varepsilon_T$  от разности измеренной и комнатной температур  $\Delta t = t - t_{\text{комн}}$  (рис.24)

5. По формуле  $\alpha = \frac{\varepsilon_{T2} - \varepsilon_{T1}}{\Delta t_2 - \Delta t_1}$  вычисли-

| $t, ^\circ\text{C}$                      | $\Delta t, ^\circ\text{C}$ | $\varepsilon'_T, \text{мВ}$  | $\varepsilon''_T, \text{мВ}$ | $\varepsilon_T, \text{мВ}$ |
|--|----------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|
|  |                            |                              |                              |                            |
|  |                            |                              |                              |                            |
|  |                            |                              |                              |                            |
|  |                            |                              |                              |                            |
|  |                            |                              |                              |                            |
|  |                            |                              |                              |                            |
|  |                            |                              |                              |                            |
|  |                            |                              |                              |                            |
| ...                                      |                            |                              |                              |                            |
| $t_{\text{комн}} = \dots ^\circ\text{C}$ |                            | $\alpha = \dots \text{мВ/К}$ |                              |                            |

те величину удельной термоЭДС  $\alpha$ , используя прямолинейный участок построенного графика. Участок графика должен содержать несколько экспериментальных точек.

#### Контрольные вопросы к лабораторной работе № 24

1. Что представляет собой термопара? В чем суть эффекта Зеебека?
2. Каков физический смысл удельной термоЭДС, измеряемой в данной работе?
3. Что надо сделать с термопарой, чтобы увеличить возникающую в ней термоЭДС? Где применяются термопары?
4. Что удерживает газ свободных электронов в металле? Какая величина называется работой выхода электрона из металла? Напряжение какой величины надо приложить к металлу, чтобы вырвать из него электрон?

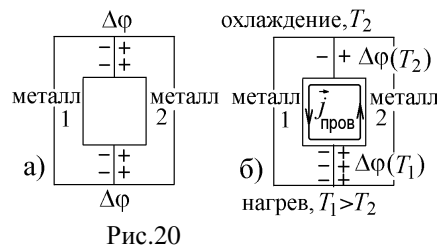


Рис.20

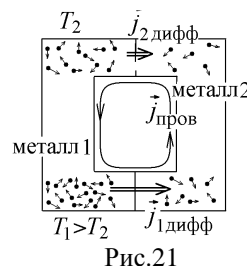


Рис.21

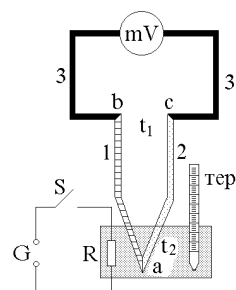


Рис.23

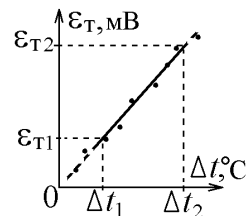


Рис.24

5. Имеются два металла 1 и 2 с разной работой выхода электрона ( $A_1 < A_2$ ). Какой из металлов при их контакте окажется заряженным положительно, а какой – отрицательно и почему?
6. Почему при соединении разных металлов образуется контактная разность потенциалов? Чему равна её величина?
7. Какие физические причины приводят к появлению термоЭДС в замкнутой цепи из двух разнородных металлов? Каковы механизмы появления термоЭДС?
8. Почему при одинаковой температуре спаев электрический ток в термопаре не течет, а при разной температуре – появляется? Чем обусловлено направление этого тока?
9. В чем заключается явление Пельтье?
10. Нарисуйте замкнутую цепь из двух разнородных металлических проводников 1 и 2, в которую включен источник внешней ЭДС (рис.22). Укажите, какой из спаев будет нагреваться, а какой охлаждаться и по какой причине, если работа выхода электрона из первого металла меньше, чем из второго ( $A_1 < A_2$ )?

#### Литература

1. Савельев И.В. Курс физики в 3-х тт.: Т. 2: Электричество - М.: Наука, 1970.- §§ 74-77.
2. Колмаков Ю. Н., Пекар Ю. А., Лагун И. М. Электричество и магнетизм,- изд. ТулГУ. 2008, гл.6 §§1-3.

## Работа №25. Определение удельного заряда электрона методом магнетрона

Цель работы: измерить удельный заряд электрона с помощью магнетрона.

### Теоретическое описание

В данной установке магнетрон – это вакуумный диод с катодом и анодом, сделанными в виде длинных цилиндров с общей осью и радиусами  $r_k$  и  $r_a$  (рис.25). Вокруг анода равномерно намотана обмотка (катушка) из  $n$  витков, приходящихся на единицу длины. Когда по катушке протекает ток  $I$ , величина которого регулируется потенциометром  $R$  (потенциометр – это резистор с регулируемым сопротивлением), то вдоль оси катушки, в пространстве между катодом и анодом, создается магнитное поле с индукцией  $\vec{B}$ .

На электроны, вылетающие с катода практически с нулевой скоростью, будет действовать электрическое поле с напряженностью  $\vec{E}$ , линии которого направлены по радиусам от положительно заряженного анода к отрицательно заряженному катоду, как показано на рис.26, где изображено поперечное сечение магнетрона.

В случае отсутствия магнитного поля  $\vec{B} = 0$  электроны летят против линий  $\vec{E}$  (траектория 1), попадая на анод и создавая анодный ток  $I_A$ , величина которого определяется падением напряжения  $U$  (разностью потенциалов между катодом и анодом).

При появлении магнитного поля  $\vec{B}$  на электроны с зарядом  $-e$  кроме электрической составляющей  $\vec{F}_{эл} = -e\vec{E}$  будет действовать магнитная составляющая силы Лоренца  $\vec{F}_{магн} = -e[\vec{v}, \vec{B}]$ . Эта сила отклоняет электроны в сторону (рис.26), меняя направление их скорости  $\vec{v}$ . При небольшой величине  $\vec{B}$  все вылетающие с катода электроны по-прежнему попадут на анод (траектория 2), и величина анодного тока не изменится.

При увеличении индукции магнитного поля до критического значения  $B_{кр}$  траектория 3 электрона изгибается настолько, что только касается анода (рис.26). С этого момента анодный ток начинает уменьшаться, так как при большем значении  $\vec{B}$  траектории электронов искривляются так, что электроны не попадают на анод (траектории 4 на рис.26).

Если длина катушки с током  $I$  бесконечна, то в таком соленоиде создается индукция магнитного поля  $B = \mu_0 I n$ , где  $n = N/l$  – число витков, приходящихся на единицу длины. При достижении критического значения  $I_{кр}$  анодный ток должен резко уменьшиться до нуля (все электроны перестают попадать на анод). В действительности, длина катушки конечна, и величина индукции уменьшается на её краях (рис.27). Если в бесконечном соленоиде индукция поля равна  $B_{кр}$ , то половина соленоида создаст половину этого поля. На краю полубесконечной катушки поле равно  $B_{кр}/2$ . Если в центре конечной катушки магнетрона поле достигло величины  $B > B_{кр}$ , и электроны перестают попадать на анод, то на её краях  $B < B_{кр}$ , и вылетевшие с катода электроны всё ещё достигают анода. Начиная с точки 3, величина анодного тока уменьшается постепенно, по мере того, как с ростом  $B$  все меньшее число электронов на краях магнетрона перестает попадать на анод.

**Вывод расчетной формулы.** В скрещенных полях  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  траектория электронов не будет окружностью. Удобно перейти в цилиндрическую систему координат, в которой ось  $z$  совпадает с осью магнетрона, а  $\vec{e}_r, \vec{e}_\theta, \vec{e}_z$  – взаимно перпендикулярные единичные орты системы координат (рис.28). Вылетевший из катода с нулевой скоростью электрон с зарядом  $-e$  движется в плоскости, перпендикулярной оси  $z$  и приобретает скорость  $\vec{v} = \vec{e}_r v_r + \vec{e}_\theta v_\theta$ . Момент импульса

$$\vec{L} = [\vec{r}, m\vec{v}] = m \cdot \det \begin{vmatrix} \vec{e}_r & \vec{e}_\theta & \vec{e}_z \\ r & 0 & 0 \\ v_r & v_\theta & 0 \end{vmatrix} = \vec{e}_z m r v_\theta \text{ меняется под действием момента силы Лоренца}$$

$$\vec{M} = [\vec{r}, -e\vec{E} - e[\vec{v}, \vec{B}]] = -e[\vec{r}, [\vec{v}, \vec{B}]] \text{ (векторы } \vec{r} \text{ и } -e\vec{E} \text{ параллельны). Раскрывая двойное векторное}$$

произведение по правилу  $[\vec{a}, [\vec{b}, \vec{c}]] = \vec{c}(\vec{a} \cdot \vec{b}) - \vec{b}(\vec{a} \cdot \vec{c})$ , учтём, что  $(\vec{r} \cdot \vec{B}) = 0$  (скалярное произведение взаимно перпендикулярных векторов). Поэтому  $\vec{M} = \vec{e}_z \cdot e B r v_r$ , где  $v_r = dr/dt$ .

Подставив полученные выражения в уравнение динамики  $d\vec{L}/dt = \vec{M}$ , получим уравнение

$$\frac{d}{dt}(m r v_\theta) = B e r \frac{dr}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{B e r^2}{2} \right). \text{ Интегрируем обе части этого уравнения, считая, что электрон движется по траектории 3, прибли-$$

жается к аноду по касательной и не имеет в этой точке радиальной проекции скорости ( $v_r = 0$  и  $v = v_\theta$ ):

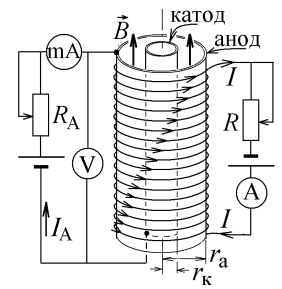


Рис.25

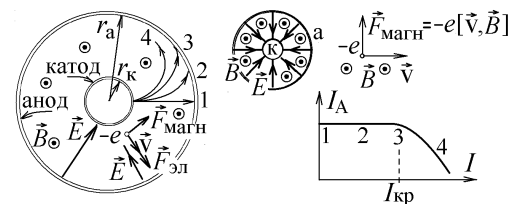


Рис.26

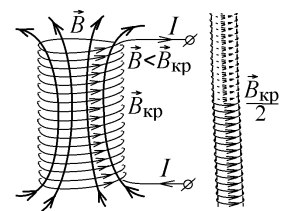


Рис.27

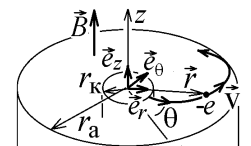


Рис.28

$\int_{r_k}^{r_a} d(Ber^2/2) = Be(r_a^2 - r_k^2)/2 = mr_a v$ . Долетев от катода до анода, электрон будет ускорен разностью потенциалов  $U_A$  между

анодом и катодом и приобретёт энергию  $eU_A = \frac{mv^2}{2}$ , откуда  $v = \sqrt{\frac{2eU_A}{m}} = \frac{Be(r_a^2 - r_k^2)}{2mr_a}$ . Считая, что анодный ток в магнетроне начинает уменьшаться при достижении критической величины индукции в центре катушки,

$$B = B_{кр} = \mu_0 I_{кр} n, \quad (3)$$

находим из полученного уравнения величину удельного заряда электрона (отношения его заряда к массе):

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_A r_a^2}{B_{кр}^2 (r_a^2 - r_k^2)^2}. \quad (4)$$

#### Порядок выполнения работы

1. Ознакомьтесь со схемой электрической цепи на рис.29. Определите цену деления каждого измерительного прибора.

2. Ручки потенциометров ПА и П поверните против часовой стрелки до упора, установив нулевые значения.

3. Включите установку в сеть. Ручкой потенциометра ПА установите анодное напряжение  $U_{A1}$  и поддерживайте его постоянным до конца снятия одной характеристики.

4. Снимите так называемую сбросовую характеристику магнетрона  $I_A = f(I)$ , т.е. зависимость величины анодного тока  $I_A$  от тока катушки  $I$ . Для этого, удерживая кнопку S в нажатом состоянии, медленно увеличивайте ток  $I$  в катушке с помощью ручки потенциометра П и заносите в таблицу значения тока  $I$  и соответствующие им значения анодного тока  $I_A$ . Снимите не менее 10 значений тока для установленного анодного напряжения  $U_{A1}$ .

5. Аналогичные сбросовые характеристики снимите для двух других значений анодного напряжения  $U_{A2}$  и  $U_{A3}$ . Рекомендуемые величины  $U_{A1}$ ,  $U_{A2}$  и  $U_{A3}$  указаны на лабораторной установке. Все результаты измерений занесите в таблицу.

6. Приведите установку в исходное состояние и отключите от сети.

7. По измеренным данным постройте графики трех сбросовых характеристик в одних координатных осях.

8. На графике каждой характеристики найдите точку сброса анодного тока  $I_A$  и соответствующее ей критическое значение тока в катушке  $I_{кр}$ . Критический ток можно определить как ток катушки, при котором ток анода начинает резко уменьшаться. При измерениях анодный ток вначале начинает уменьшаться не слишком значительно и сбросовые характеристики выглядят так, как показано на рис.30. На этом рисунке показано как с помощью двух прямых асимптотических линий определить положение точки  $I_{кр}$ .

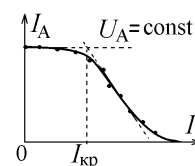


Рис.30

9. По формуле (3) вычислите значение критической индукции магнитного поля катушки  $I_{кр}$ , а затем по формуле (4) рассчитайте величину удельного заряда электрона  $e/m$  для каждого из трех опытов с разными значениями  $U_A$ . и найдите его среднее значение.  $\langle e/m \rangle$ .

10. Определите случайные отклонения  $\Delta(e/m) = e/m - \langle e/m \rangle$  для каждого измерения  $i = 1, 2, 3$  и среднее квадратичное отклонение

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (\Delta e/m)^2}. \text{ Вычислите погрешность}$$

$\Delta e/m$  результата измерений:  $\Delta e/m = S/\sqrt{3}$ . Результаты вычислений занести в таблицу.

11. Записать результат в виде  $(e/m)_{эсп} = (\langle e/m \rangle \pm \Delta e/m)$ , Кл/кг и сравнить его с табличным значением отношения величины заряда электрона  $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл к его массе  $m = 9,11 \cdot 10^{-31}$  Кг.

#### Контрольные вопросы к лабораторной работе № 25

- На электрической схеме установки покажите замкнутую цепь, по которой течет ток  $I$  катушки (соленоида), и цепь, по которой течет анодный ток  $I_A$ . Укажите приборы, которые измеряют эти токи.
- С какой целью магнетрон окружен витками соленоида? Что меняется при уве-

| № п/п  | $U_{A1} = \dots \text{ В}$ |                    | $U_{A2} = \dots \text{ В}$  |                    | $U_{A3} = \dots \text{ В}$ |                    |
|--|----------------------------|--------------------|---|--------------------|----------------------------|--------------------|
|  | $I, \text{ А}$             | $I_A, \text{ мкА}$ | $I, \text{ А}$  | $I_A, \text{ мкА}$ | $I, \text{ А}$             | $I_A, \text{ мкА}$ |
| 1  |                            |                    |   |                    |                            |                    |
| ...  |                            |                    |   |                    |                            |                    |
| 10   |                            |                    |   |                    |                            |                    |
| $I_{\text{кр}}, \text{ А}$   |                            |                    |   |                    |                            |                    |
| $B_{\text{кр}}, \text{ Тл}$  |                            |                    |   |                    |                            |                    |
| $e/m, \text{ Кл/кг}$   |                            |                    |   |                    |                            |                    |
| $(e/m)_{\text{эксп}} = \dots \pm \dots \text{ Кл/кг}$<br>(экспериментальное) |                            |                    | $(e/m)_{\text{табл}} = 1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$<br>(табличное) |                    |                            |                    |

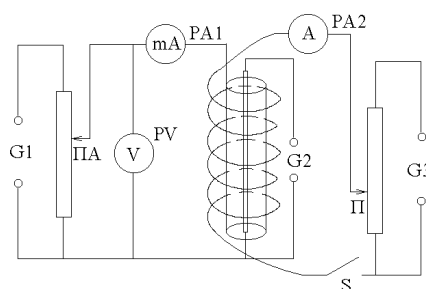


Рис.29



личении тока  $I$ , текущего по этим виткам?

3. Какова величина и направление вектора индукции магнитного поля, создаваемого в магнетроне? Как можно изменить эту величину?

4. Напишите выражение силы Лоренца, которая действует на электрон, движущийся в скрещенных электрическом и магнитном полях. Укажите направление электрической и магнитной составляющих этой силы.

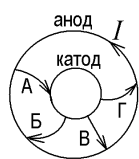


Рис.А

5. Направление тока  $I$ , текущего по виткам намотанной на цилиндрический анод катушки, указано на рис.А.

Укажите и объясните правильную траекторию движения одного из электронов, создающих анодный ток.

6. Что называется удельным зарядом электрона, как вычислить его величину и чему она должна быть равна?

7. Укажите соответствие траекторий электронов, вылетающих из катода на левом

рис.А, рис.Б, и точек графика зависимости анодного тока  $I_A$  от тока  $I$ , протекающего по виткам катушки (правый рис.Б).

8. Объясните поведение графиков зависимости  $I_A = I_A(I)$ : почему при увеличении тока  $I$  величина  $I_A$  вначале не меняется? на каком основании определяют критическое значение тока  $I_{кр}$ ?

почему после достижения критической величины  $I$  анодный ток уменьшается постепенно, а не падает скачком до нуля? почему величина  $I_A$  возрастает с ростом напряжения  $U_A$ ?

9. Сделайте и объясните вывод расчетной формулы для вычисления удельного заряда электрона в данной работе.

10. Может ли электрон в скрещенных однородных электрическом  $\vec{E}$  и магнитном  $\vec{B}$  полях двигаться с постоянной по величине и направлению скоростью? Если да, то при каких условиях, и чему равна минимальная величина такой скорости?

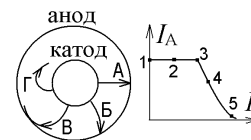


Рис.Б

### Литература

1. Савельев И.В. Курс физики в 3-х тт.: Т. 2: Электричество - М.: Наука, 1970.- §§ 38, 39, 47, 64-66.
2. Колмаков Ю. Н., Пекар Ю. А., Лагун И. М. Электричество и магнетизм,- изд. ТулГУ. 2008, гл.7 §§2,5,8,9.

## Работа №26. Магнитное поле Земли

**Цель работы:** измерение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли методом тангенс-гальванометра.

### Теоретическое описание

Плоскость компаса совпадает с горизонтальной плоскостью. Индукция магнитного поля Земли будет суммой горизонтальной и вертикальной составляющих  $\vec{B}_3 = \vec{B}_{\text{гор}} + \vec{B}_{\text{верт}}$  (рис.31).

В северном полушарии вертикальная составляющая  $\vec{B}_{\text{верт}}$  направлена вниз, перпендикулярна плоскости компаса и не действует на его магнитную стрелку, которая направлена вдоль горизонтальной составляющей  $\vec{B}_{\text{гор}}$  (рис.31,а). В этом же направлении ориентируют плоскость катушки тангенс-гальванометра из  $N$  витков (стрелка компаса – в его центре).

Если по катушке пропустить ток  $I$ , то в центре витка радиуса  $R$  будет создано магнитное поле тока с индукцией  $B_I = \mu_0 I / (2R)$  (это выражение можно получить с помощью закона Био-Савара). В катушке из  $N$  витков суммарная индукция магнитного поля тока перпендикулярна плоскости катушки, равна  $B_k = \mu_0 NI / (2R)$  и отклоняет стрелку компаса на угол  $\alpha$  относительно горизонтальной линии магнитного меридиана (рис.31,б,в). Стрелка установится в горизонтальной плоскости вдоль результирующего вектора  $\vec{B}_{\text{рез}} = \vec{B}_{\text{гор}} + \vec{B}_k$ . Измерив тангенс угла отклонения стрелки компаса  $\alpha$ :  $\text{tg } \alpha = B_k / B_{\text{гор}}$  (рис.31,в) легко найти горизонтальную составляющую индукции магнитного поля Земли в месте нахождения компаса:

$$B_{\text{гор}} = \frac{\mu_0 IN}{2R \text{tg } \alpha}. \quad (5)$$

Чем больше величина тока  $I$  в катушке, тем больше угол отклонения стрелки.

Источником постоянного магнитного поля являются движущиеся электрические заряды или токи любой природы, например, токи намагничивания в магнитных средах (рис.32). Линии индукции  $\vec{B}$  охватывают линии тока и **всегда замкнуты**.

Поэтому магнитное поле называют **вихревым**, в отличие от **потенциального** электростатического поля, линии напряженности  $\vec{E}$  которого начинаются или заканчиваются на электрических зарядах. Помните однако, что и электростатическое, и постоянное магнитное поле являются составляющими единого электромагнитного поля, описываемого уравнениями Максвелла. Постоянное магнитное поле в одной инерциальной системе отсчета превращается в электростатическое поле в другой системе отсчета и наоборот.

Индукцию магнитного поля  $\vec{B}$  можно рассматривать как векторную характеристику, определяющую величину силы, действующей на движущийся в магнитном поле заряд  $q$  (магнитная составляющая силы Лоренца) или на элемент тока  $I d\vec{l}$  (сила Ампера, рис.33). Величина магнитного поля пропорциональна величине его индукции.

### Объяснение природы магнитного поля Земли.

Геомагнитное поле не постоянно и на 95% создается в земном ядре, имеющем радиус  $R_{\text{я}} \approx 2900$  км. Внешняя часть ядра состоит из расплавленного при очень большом давлении жидкого железа с температурой  $\sim 4600$  К, в котором создаются конвекционные потоки жидкости. Эти потоки все время распадаются на отдельные гигантские вихри, вместе с которыми движутся “вмороженные” в них линии



Рис.34

создается результирующее магнитное поле, которое на 80% совпадает с полем **магнитного диполя** с огромным магнитным моментом  $p_m = 8,3 \cdot 10^{22}$  А·м (рис.35). Положение этого диполя меняется с медленным изменением вихревого движения электропроводящей жидкости в ядре Земли. Центр диполя смещен приблизительно на 300-400 км от центра Земли, а его ось не совпадает с осью вращения Земли и пересекает поверхность Земли в точках, которые называются **геомагнитными полюсами** (рис.35). В на-

индукции  $\vec{B}$ , созданные токами заряженных ионов и электронов. Вихри жидкости при турбулентном движении перекручиваются, разделяются, накладываются друг на друга. При этом, как показано на рис.34, складываются линии  $\vec{B}$ , усиливая, ослабляя или даже меняя направление результирующего магнитного поля. Подобные процессы изучает **магнитная гидродинамика**.

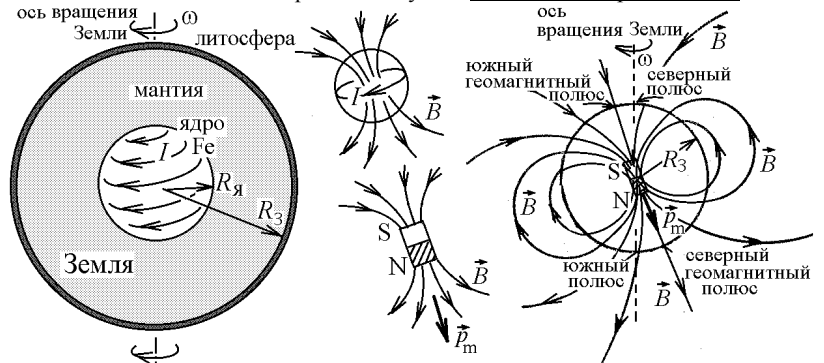


Рис.35

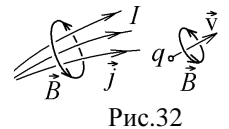


Рис.32

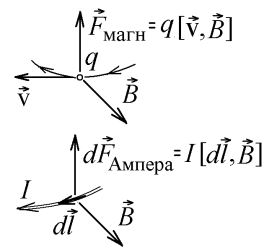


Рис.33

стоящее время южный геомагнитный полюс Земли находится вблизи северного полюса и постепенно перемещается со средней скоростью 10 км/год от северного побережья Канады к Сибири.

Дрейф магнитных полюсов связан не только с изменением токов в ядре Земли, но и с тем, что величины угловых скоростей вращения земного ядра, мантии и твердой оболочки (литосферы) не совпадают. Поэтому земная кора понемногу смещается относительно оси вращения Земли и оси магнитного диполя. 600 миллионов лет назад континенты (участки земной коры), которые сейчас находятся вблизи экватора, находились на полюсах Земли. Там же (немного южнее современного экватора) находился, например, северный магнитный полюс.

Известно, что магнитное поле Земли тысячи раз меняло направление магнитных полюсов, постепенно, раз в  $10^6$  лет, уменьшаясь до нуля, а затем возникая в противоположном направлении. При этом в течении  $10^3 - 10^4$  лет Земля оказывалась без защитного магнитного поля, предотвращающего её поверхность от попадания сильных потоков космических лучей. Объяснить это можно только переменной направленности токов в ядре Земли (рис.34).

В настоящее время индукция  $\vec{B}$  поля Земли максимальна на магнитных полюсах (~65 мкТл) и минимальна вблизи экватора (~35 мкТл). Горизонтальная составляющая  $\vec{B}_{\text{гор}}$ , наоборот, максимальна на экваторе, где линии  $\vec{B}$  почти горизонтальны, и  $\vec{B}_{\text{гор}} = 0$  на магнитных полюсах, где линии  $\vec{B}$  направлены по вертикали к поверхности Земли (рис.35). В районе Тулы  $\vec{B}_{\text{гор}} \approx 25$  мкТл.

Однако, в земной коре много намагниченных ферромагнитных руд, которые создают аномальное магнитное поле (~4% магнитного поля Земли). Эти источники магнитного поля находятся вблизи земной поверхности и могут заметно изменить форму и направление линии  $\vec{B}$ , вдоль которой ориентируется стрелка компаса (рис.36). Так в районе Курской магнитной аномалии линии  $\vec{B}$  направлены так же вертикально, как и на магнитном полюсе.

Заметное влияние на стрелку компаса оказывают также ионосферные токи, вызванные потоком солнечных космических лучей (потоком протонов, попадающих в магнитное поле Земли). В период сильных магнитных бурь (возмущений магнитного поля Земли, вызванных солнечной активностью), величина  $B_{\text{Земли}}$  может измениться на  $\sim 1 \div 2$  мкТл, что вблизи полярного круга, где мала величина  $\vec{B}_{\text{гор}}$ , вызовет отклонения стрелки магнитного компаса на  $10-20^\circ$  (за сутки положение магнитного полюса Земли может описать круг диаметром в сотни километров).



Рис.36

#### Порядок выполнения работы

1. Не включая источник тока, установите тангенс-гальванометр в плоскости магнитного меридиана. При этом стрелка компаса должна быть направлена по диаметру тангенс-гальванометра (вдоль плоскости витков, рис.31,а). Обратите внимание на то, чтобы северный конец стрелки указывал на нулевое значение компаса.

2. Установите регулятор потенциометра (или реостата) на минимальный ток через тангенс-гальванометр и затем включите источник тока.

3. Изменяя регулятором потенциометра ток через равные интервалы, определяйте угол отклонения  $\alpha$  стрелки (рис.31,б). Необходимо некоторое время, чтобы стрелка компаса успокоилась и перестала колебаться. Записывайте величины тока  $I$  и углы отклонения от первоначального положения северного  $\alpha_1$  и южного  $\alpha_2$  полюсов стрелки в таблицу. Измерить надо не менее 5 значений тока (и соответствующие им углы).

**Внимание:** отклонение любого полюса стрелки есть разность начального и конечного показания компаса и не может превысить  $90^\circ$ .

4. Измените направление тока в гальванометре с помощью переключателя на установке. Прделайте пункт 3, устанавливая те же значения токов и фиксируя углы отклонения от первоначального положения северного  $\alpha_3$  и южного  $\alpha_4$  полюсов стрелки. Стрелка будет отклоняться от первоначального положения в другую сторону. Дублирование измерений делается для того, чтобы исключить систематическую погрешность, связанную с неточной установкой катушки в плоскости магнитного меридиана, а также с определением самой этой плоскости. Данные занесите в таблицу.

| № п/п              | $I$ , мА | $\alpha_1, ^\circ$ | $\alpha_2, ^\circ$ | $\alpha_3, ^\circ$                | $\alpha_4, ^\circ$ | $\langle \alpha \rangle, ^\circ$               | $\text{tg} \langle \alpha \rangle$ | $B_{\text{гор}}$ , мкТл                             | $\Delta B_{\text{гор}}$ , мкТл | $E$ |
|--------------------|----------|--------------------|--------------------|-----------------------------------|--------------------|--|------------------------------------|---|--------------------------------|-----|
| 1                  |          |                    |                    |                                   |                    |  |                                    |   |                                |     |
| 2                  |          |                    |                    |                                   |                    |  |                                    |   |                                |     |
| 3                  |          |                    |                    |                                   |                    |  |                                    |   |                                |     |
| 4                  |          |                    |                    |                                   |                    |  |                                    |   |                                |     |
| 5                  |          |                    |                    |                                   |                    |  |                                    |   |                                |     |
| $N = \dots$ витков |          | $R = \dots$ м      |                    | $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м |                    | $\langle B_{\text{гор}} \rangle = \dots$ мкТл; |                                    | $(\Delta B_{\text{гор}})_{\text{max}} = \dots$ мкТл |                                |     |

5. Определите среднее значение угла  $\langle \alpha \rangle$  для каждого значения тока  $I$  по формуле  $\langle \alpha \rangle = (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4) / 4$ .

6. По формуле (5) надо вычислить  $B_{\text{гор}}$  для каждого значения тока, подставляя вместо  $\alpha$  среднее значение этого угла  $\langle \alpha \rangle$ . Величины  $R$  и  $N$  указаны на установке.

7. По вычисленным значениям  $B_{\text{гор}}$  найдите среднее значение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли  $\langle B_{\text{гор}} \rangle$

8. Определите относительную  $E$  и абсолютную  $\Delta B_{\text{гор}}$  погрешности по формулам

$$E = \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta R}{R} + \frac{2\Delta\alpha}{\sin 2\alpha}, \quad \Delta B_{\text{гор}} = B_{\text{гор}} \cdot E,$$

в которых  $\Delta I$ ,  $\Delta R$  и  $\Delta\alpha$  определяются как половина деления прибора, с помощью которого были измерены величины  $I$ ,  $R$  и  $\alpha$ , причем  $\Delta\alpha$  **надо выразить в радианах**. Если значение какой-либо величины уже указано в описании установки, например  $R$ , то абсолютная погрешность этой величины определяется как половина единицы последнего разряда. Пример:  $R=20,15$  см. Единица последнего разряда - это одна сотая. Таким образом,  $\Delta R = 0,01/2 = 0,005$  см.

9. Определите наибольшее значение абсолютной погрешности  $(\Delta B_{\text{гор}})_{\text{max}}$  и запишите результат измерений в

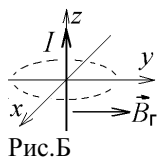
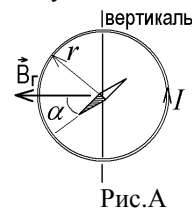
виде  $B_{\text{гор}} = \langle B_{\text{гор}} \rangle \pm (\Delta B_{\text{гор}})_{\text{max}}$  мкТл, т.е.

$B_{\text{гор}} = \dots \pm \dots$  мкТл.

Сравните полученное значение  $B_{\text{гор}}$  с истинным, которое в районе Тулы равно  $B_{\text{гор}} \approx 25$  мкТл.

#### Контрольные вопросы к лабораторной работе № 26

1. Что является источником постоянного магнитного поля? Чем постоянное магнитное поле отличается от электростатического поля и почему оно называется вихревым?
2. Дайте определение вектора индукции магнитного поля.
3. Сформулируйте закон Био-Савара и получите с его помощью формулу для величины индукции магнитного поля в центре и на оси тангенс-гальванометра с током  $I$ ,  $N$  витков которого имеют радиус  $R$ .
4. Нарисуйте линии индукции магнитного поля, созданного током, текущим по тангенс-гальванометру. Будут ли они замкнутыми и почему?
5. С какой силой или моментом силы магнитное поле Земли действует на движущую заряженную частицу? на прямолинейный проводник с током? на круговой виток с током? на стрелку магнитного компаса?
6. Покажите на экспериментальной установке направление вертикальной и горизонтальной составляющих вектора индукции магнитного поля Земли, а также направление вектора индукции магнитного поля, созданного током, текущим по виткам тангенс-гальванометра. В какую сторону будет поворачиваться стрелка компаса при увеличении или уменьшении тока?
7. Плоскость витков катушки тангенс-гальванометра параллельна вектору  $\vec{B}_Г$  горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли (рис.А).  $I$  – ток в катушке,  $N$  – число витков в катушке,  $r$  – их радиус. При каком условии стрелка компаса в центре катушки повернута на угол  $\alpha = 45^\circ$  относительно плоскости витков?



8. Прямой бесконечный ток  $I$  течёт вдоль вертикальной оси  $z$ . Горизонтальная составляющая индукции магнитного поля Земли направлена вдоль оси  $y$  (рис.Б). Укажите в какой точке и на каком расстоянии от тока  $I$  вектор индукции суммарного магнитного поля тока и магнитного поля Земли будет направлен вертикально.
9. Сделайте вывод расчетной формулы (5) для определения величины горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли.

10. Какие причины приводят к появлению магнитного поля Земли? Как направлены линии индукции геомагнитного поля в северном и южном полушарии?
11. Почему магнитный компас нельзя использовать вблизи геомагнитных полюсов Земли? Направлена ли стрелка компаса на северный полюс?
12. Что должно происходить с величиной горизонтальной составляющей магнитного поля Земли в зависимости от географической широты? Почему в разных точках Земли на одной широте и в разное время стрелка компаса может не показывать на геомагнитный полюс?

#### Литература

1. Савельев И.В. Курс физики в 3-х тт.: Т. 2: Электричество - М.: Наука, 1970.- §§ 39-42, 48.
2. Колмаков Ю. Н., Пекар Ю. А., Лагун И. М. Электричество и магнетизм,- изд. ТулГУ. 2008, гл.7 §§5,8,9, гл.8 §§1,2.

## Работа №27. Исследование магнитного поля соленоида

**Цель работы:** экспериментальное определение значений магнитной индукции на оси соленоида и сравнение их с расчетными значениями.

### Теоретическое описание

С помощью теоремы о циркуляции легко вычислить поле внутри бесконечного соленоида, по виткам которого течет ток  $I$ . Прямые линии индукции  $\vec{B}_\infty$  внутри соленоида уходят в бесконечность, и охватывая  $N$  витков соленоида прямоугольным контуром длины  $l$ , изображенным штриховой линией на рис.37,а, получаем  $\oint \vec{B} d\vec{l} = B_\infty l = \mu_0 IN$  или  $B_\infty = \mu_0 IN/l$ .

В исследуемом соленоиде конечной длины  $l$  с радиусом витков  $r_0$  линии индукции  $\vec{B}$  изогнуты (рис.37,б), и удобного для интегрирования по теореме о циркуляции замкнутого контура нет. Для вычисления  $B$  на оси такого соленоида, имеющего  $N$  витков с током  $I$ , воспользуемся законом Био-Савара. Определим индукцию  $B$  в точке А, находящейся на расстоянии  $a$  от края соленоида. Разобьём боковую поверхность соленоида на узкие кольцевые полоски ширины  $dx$  на расстоянии  $x$  от точки А. По всем  $N$  виткам на боковой поверхности протекает ток  $NI$ , а по такой полоске течет ток  $dI = NI \cdot dx/l$ , пропорциональный её ширине.

С помощью закона Био-Савара легко показать, что на оси кругового витка радиуса  $r_0$  с током  $I$  на расстоянии  $x$

от центра 0 витка (рис.37,в) создается магнитное поле с индукцией  $B_k = \frac{\mu_0 I}{2} \frac{r_0^2}{(r_0^2 + x^2)^{3/2}}$ . Аналогично, кольцевой ток  $dI$

создаст в точке А поле  $dB = \frac{\mu_0 dI}{2} \frac{r_0^2}{(r_0^2 + x^2)^{3/2}}$ . Суммируя вклады всех полосок, т.е. вычисляя интеграл, находим рас-

четную формулу для теоретически вычисленной величины индукции магнитного поля на оси конечного соленоида длины  $l$  на расстоянии  $a$  от его края:

$$B_{\text{теор}} = \int_{x=-a}^{x=l-a} dB = \frac{\mu_0 NI r_0^2}{2l} \int_{-a}^{l-a} \frac{dx}{(r_0^2 + x^2)^{3/2}} = \frac{\mu_0 NI}{2l} \left( \frac{l-a}{\sqrt{r_0^2 + (l-a)^2}} + \frac{a}{\sqrt{r_0^2 + a^2}} \right). \quad (6)$$

Кроме этого, величина индукции определяется в данной лабораторной работе экспериментально с помощью баллистического гальванометра.

Схема эксперимента изображена на рис.38.

По оси соленоида длины  $l$  и радиуса  $r_0$ , состоящего из  $N$  витков, перемещается маленькая измерительная катушка  $K_{\text{и}}$  из  $N_{\text{и}}$  витков с площадью  $S_{\text{и}}$  и с индуктивностью  $L_{\text{и}}$ , расстояние  $a$  которой от края соленоида определяют по положению совмещенного с катушкой указателя. Кнопкой  $S$  соленоид подключают к источнику постоянного тока, и по его виткам начинает течь ток  $I$ , создающий на оси соленоида магнитное поле с индукцией  $\vec{B}$ . Возникающая в соленоиде ЭДС самоиндукции препятствует мгновенному появлению этого тока. Он нарастает до установившегося значения некоторое время  $\tau$ , в течение которого меняется поле  $B$ , а в измерительной катушке  $K_{\text{и}}$  возрастает магнитный поток  $\Phi_{\text{и}} = BN_{\text{и}}S_{\text{и}}$ .

Измерительная катушка соединена с рамкой баллистического гальванометра, и образует замкнутую цепь с сопротивлением  $R$ . В такой цепи возникает ЭДС индукции  $\mathcal{E}_{\text{и}} = -d\Phi_{\text{и}}/dt$  и появляется меняющийся ток  $I_{\text{и}}$ , что приводит к появлению ЭДС самоиндукции  $\mathcal{E}_{\text{с}} = -L_{\text{и}} dI_{\text{и}}/dt$ . Интегрируя по времени уравнение правила Кирхгофа,

$$-I_{\text{и}}R = \mathcal{E}_{\text{и}} + \mathcal{E}_{\text{с}} = -\frac{d\Phi_{\text{и}}}{dt} - L_{\text{и}} \frac{dI_{\text{и}}}{dt}, \text{ получаем } -R \int_0^\tau I_{\text{и}} dt = -\int_0^\tau d\Phi_{\text{и}} - L_{\text{и}} \int_0^\tau dI_{\text{и}} = -BN_{\text{и}}S_{\text{и}}. \text{ Здесь } \int_0^\tau I_{\text{и}} dt = q - \text{заряд, протекший}$$

через измерительную катушку за время установления поля  $B$  в соленоиде. Ток  $I_{\text{и}}$  в момент  $\tau$  прекращается, так как величина  $\Phi_{\text{и}}$  достигает постоянной установившейся величины, и исчезает ЭДС индукции, приводившая к появлению тока.

$$\text{Поэтому } I_{\text{и}}(\tau) = I_{\text{и}}(0) = 0 \text{ и } \int_0^\tau dI_{\text{и}} = 0.$$

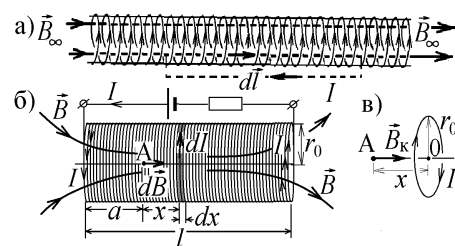


Рис.37

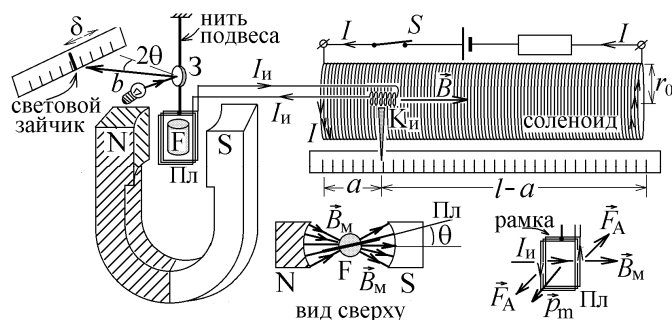


Рис.38

Таким образом, протекший по измерительной катушке заряд  $q$  пропорционален установившейся величине индукции магнитного поля в том месте, где она находится:  $q = BN_{\text{и}}S_{\text{и}}/R$ .

Индукционный ток  $I_{\text{и}}$  протекает по подвешенной на нити прямоугольной рамке баллистического гальванометра с площадью  $S_{\text{р}}$ , имеющей  $N_{\text{р}}$  витков и большой момент инерции  $I_{\text{р}}$  (рис.38). Постоянный магнит и железный цилиндр  $F$ , который охватывают витки рамки, создают магнитное поле с индукцией  $B_{\text{м}}$ , линии которого радиальны, и при повороте рамки на любой угол  $\theta$  параллельны плоскости рамки “Пл” (рис.38). При протекании тока  $I_{\text{и}}$ , рамка имеет магнитный момент  $p_m = I_{\text{и}}N_{\text{р}}S_{\text{р}}$ , и на неё действует момент сил  $M = [\vec{p}_m, \vec{B}_{\text{м}}] = I_{\text{и}}N_{\text{р}}S_{\text{р}}B_{\text{м}} \sin 90^\circ$ . Согласно уравнению динамики вращательного движения,  $I_{\text{р}} \frac{d\omega}{dt} = M$ . Рамка приходит во вращение, приобретая за время  $\tau$  угловую скорость

$$\omega = \int_0^\tau \frac{M}{I_{\text{р}}} dt = \frac{N_{\text{р}}S_{\text{р}}B_{\text{м}}}{I_{\text{р}}} \int_0^\tau I_{\text{и}} dt = \frac{N_{\text{р}}S_{\text{р}}B_{\text{м}}}{I_{\text{р}}} q.$$

Чтобы закрутить нить подвеса на угол  $\theta$ , к ней надо приложить момент силы, пропорциональный углу закручивания:  $M_{\text{кр}} = K\theta$ , где  $K = \text{const}$ . Полученная рамкой кинетическая энергия вращательного движения превращается в ра-

боту момента силы:

$$\frac{I_{\text{р}}\omega^2}{2} = \int M_{\text{кр}} d\theta = K \int \theta d\theta = \frac{K\theta^2}{2}.$$

На нити подвеса укреплено крошечное зеркальце  $З$  (рис.38), которое вместе с нитью повернется на угол  $\theta = \omega \cdot \sqrt{I_{\text{р}}/K}$ . Луч лампочки отражается от зеркальца и создает световой зайчик на шкале, находящейся на удалении  $b$ .

При повороте зеркальца на малый угол  $\theta$ , зайчик сместится по шкале на расстояние  $\delta = b \cdot 2\theta$ . Учитывая все полученные результаты, видим, что экспериментально определенная величина индукции магнитного поля на оси соленоида в том месте, где находится измерительная катушка  $K_{\text{и}}$ , пропорциональна отклонению зайчика:

$$B_{\text{экс}} = k\delta, \text{ где } k = \frac{R\sqrt{KI_{\text{р}}}}{2bN_{\text{р}}N_{\text{и}}S_{\text{р}}S_{\text{и}}B_{\text{м}}}. \quad (7)$$

Современные приборы, измеряющие малые изменения тока или напряжения, основаны на принципе измерения протекшего по цепи заряда и обладают намного большей чувствительностью и точностью.

#### Порядок выполнения работы

1. Ознакомьтесь с установкой и включите ее в сеть (220 В).
2. Ручкой на установке поместите измерительную катушку  $K_{\text{и}}$  у одного из концов соленоида, определив ее положение  $a$  (расстояние от края соленоида до точки, в которой определяется значение магнитной индукции) с помощью указателя на шкале (линейке, см.рис.38).
3. Нажмите на кнопку  $S$  и измерьте отклонение светового зайчика  $\delta$  по шкале гальванометра. Не отпуская кнопку, определите силу тока в соленоиде по миллиамперметру.
4. Такие же измерения расстояния  $a$  и отклонения зайчика  $\delta$  проделайте для других положений катушки  $K_{\text{и}}$ , перемещая ее каждый раз на 1 см вдоль оси соленоида до упора. Занесите данные в таблицу.

5. По формуле (7) найдите экспериментальные значения магнитной индукции, воспользовавшись значением  $k$ , указанным на установке.

6. Для тех же значений  $a$  рассчитайте по формуле (6) теоретически вычисленные значения индукции магнитного поля

$$B_{\text{теор}} = \frac{\mu_0 NI}{2l} (\cos \beta_1 + \cos \beta_2),$$

где  $\cos \beta_1 = \frac{a}{\sqrt{r_0^2 + a^2}}$ ,  $\cos \beta_2 = \frac{l-a}{\sqrt{r_0^2 + (l-a)^2}}$ . Данные вы-

числений занести в таблицу. Значения  $N$  и  $l$  даны на установке.

8. По значениям  $B_{\text{экс}}$ , определенным на опыте, и  $B_{\text{теор}}$ , вычисленным теоретически, постройте графики  $B_{\text{экс}} = f_1(a)$  и  $B_{\text{теор}} = f_2(a)$  в одних координатных осях (на одном листе). Сравните построенные графики.

#### Контрольные вопросы к лабораторной работе № 27

1. Нарисуйте линии индукции магнитного поля, созданного током, текущим по виткам катушки-соленоида с учетом направления этого тока. Будут ли эти линии замкнутыми и почему?
2. Сформулируйте теорему о циркуляции вектора магнитной индукции и с её помощью определите величину индукции магнитного поля внутри бесконечно длинного соленоида с током  $I$ , у которого на длину  $l$  приходится  $N$  витков.
3. Сформулируйте закон Био-Савара и с его помощью получите выражение величины индукции магнитного поля на оси кругового витка с током.

| $a$ , м   | $\delta$ , дел | $B_{\text{экс}}$ , Тл | $\cos \beta_1$ | $\cos \beta_2$ | $B_{\text{теор}}$ , Тл |
|---|----------------|-----------------------|----------------|----------------|------------------------|
| 0   |                |                       |                |                |                        |
| 0,01  |                |                       |                |                |                        |
| ....  |                |                       |                |                |                        |
| $a = l$   |                |                       |                |                |                        |
| $N = \dots$ витков; $l = \dots$ м; $k = \dots$ Тл/дел; $I = \dots$ А. |                |                       |                |                |                        |

4. Сделайте вывод расчетной формулы для величины индукции магнитного поля на оси соленоида конечной длины  $l$  с радиусом витков  $r$ .
5. Определите величину отношения индукции магнитного поля в центре соленоида (при  $a = l/2$ ) и на его краях (при  $a = 0$  или  $l$ ). Совпадает ли эта величина с той, что следует из построенного Вами графика?
6. Объясните принцип работы баллистического гальванометра, используемого в данной работе.
7. В чем состоит явление электромагнитной индукции? Сформулируйте закон Фарадея для определения ЭДС электромагнитной индукции и с его помощью объясните, почему заряд, протекающий по измерительной катушке, пропорционален величине индукции магнитного поля, в которую её вносят. Почему размер измерительной катушки должен быть малым?
8. Почему при включении тока в соленоиде поворачивается зеркальце, создающее световой “зайчик”? Почему вращающий зеркальце момент сил пропорционален измеряемой индукции магнитного поля?
9. Почему световой “зайчик” сразу же возвращается в исходное положение, если нажать кнопку включения тока в соленоиде и не отпускать её?
10. Сделайте вывод формулы зависимости смещения  $\delta$  “зайчика” от величины индукции  $B$ . От каких параметров установки зависит коэффициент пропорциональности  $k$  между этими величинами?
11. Каким способом проще всего увеличить смещение  $\delta$  “зайчика”, не меняя силу тока в соленоиде и параметры измерительной катушки?
12. Почему баллистические гальванометры, измеряющие величину тока по величине протекающего заряда более точны, чем обычные амперметры?

#### Литература

1. Савельев И.В. Курс физики в 3-х тт.: Т. 2: Электричество - М.: Наука, 1970.- §§ 39-42, 48, 55-57, 59, 62.
2. Колмаков Ю. Н., Пекар Ю. А., Лагун И. М. Электричество и магнетизм,- изд. ТулГУ. 2008, гл.7 §§5,8,9, гл.8 §§1,2.
3. Колмаков Ю.Н., Пекар Ю.А., Лежнева Л.С. Электромагнетизм и оптика,- изд. ТулГУ. 2010, гл.I §§ 3-5.

## Работа №28. Определение индуктивности тороида с ферритовым магнитопроводом

Цель работы: изучение зависимости индуктивности тороида от силы тока.

### Теоретическое описание

Электрическая схема установки изображена на рис.39. На тороидальный сердечник намотана обмотка из  $N$  витков тонкого провода, по которому течет ток  $I$  от подключенного источника переменной ЭДС с амплитудой  $\varepsilon_0$  и циклической частотой  $\omega$ . Величину тока меняют, изменяя сопротивление потенциометра  $R$ . Если  $L$  – индуктивность такой тороидальной катушки, а  $R_k$  – её омическое (активное) сопротивление, то с учетом ЭДС самоиндукции правило Кирхгофа для изображенной на рис.39 замкнутой цепи имеет вид  $I(R + R_k) = \varepsilon_0 \cos(\omega t) - L \cdot dI/dt$ . Решение этого уравнения вынужденных колебаний известно. Амплитуда вынужденных колебаний тока в цепи связана с амплитудой ЭДС через полное сопротивление цепи

переменному току  $Z = \sqrt{(\omega L)^2 + (R + R_k)^2}$ , т.е.  $I = I_0 \sin(\omega t + \alpha) = \frac{\varepsilon_0}{Z} \sin(\omega t + \alpha)$ .

Сопротивление  $\omega L$  называют индуктивным сопротивлением.

Можно найти падение напряжения на контактах тороидальной катушки:  $U = IR_k + L dI/dt$ . Подстановка дает

$U = I_0 R_k \sin(\omega t + \alpha) + I_0 \omega L \cos(\omega t + \alpha)$  или  $U = I_0 \sqrt{(\omega L)^2 + R_k^2} (\cos \theta \cdot \sin(\omega t + \alpha) + \sin \theta \cdot \cos(\omega t + \alpha))$ , где

$$\cos \theta = \frac{R_k}{\sqrt{(\omega L)^2 + R_k^2}}, \quad \sin \theta = \frac{\omega L}{\sqrt{(\omega L)^2 + R_k^2}}, \quad \text{т.е. } U = I_0 \sqrt{(\omega L)^2 + R_k^2} \cos(\omega t + \alpha - \theta) = U_0 \cos(\omega t + \alpha - \theta)$$

Амперметр и вольтметр измеряют не амплитудные, а действующие или эффективные величины тока и напряжения  $I = I_0/\sqrt{2}$ ,  $U = U_0/\sqrt{2}$ . Это величины **постоянного** тока, который оказывает такое же действие, как и переменный ток с амплитудами  $I_0$ ,  $U_0$ . Их отношение равно отношению амплитуд:  $U/I = U_0/I_0 = \sqrt{(\omega L)^2 + R_k^2}$ . В данной работе сопротивление провода, намотанного на тороидальный сердечник, считается пренебрежимо малым,  $R_k = 0$ , что позволяет определить индуктивность катушки по измеренным показаниям амперметра и вольтметра:

$$L = \frac{U}{I \omega}. \quad (8)$$

Чтобы вычислить индуктивность  $L$ , воспользуемся теоремой о циркуляции вектора индукции  $\vec{B}$  магнитного поля, линии которого внутри соленоида образуют замкнутые окружности (рис.39). Приняв такую окружность радиуса  $r$  за контур интегрирования, получим  $\oint \vec{B} d\vec{l} = B \oint dl = B \cdot 2\pi r = \mu \mu_0 IN$  (контур охватывает  $N$  витков с током  $I$ ). Величина магнитного поля  $B = \frac{\mu \mu_0 IN}{2\pi r}$  зависит от расстояния  $r$  до центра 0 тороида. Поэтому магнитный поток через площадь  $S_B$  одного витка (рис.40) можно только приблизительно записать в виде  $\Phi_1 = BS_B$ . Поток через все  $N$  витков связан с индуктивностью катушки:  $\Phi = NBS_B \approx LI$ . Отсюда  $L \approx \frac{\mu \mu_0 S_B N^2}{2\pi r}$ . Результат вычисления  $L$

по этой формуле, где  $r$  – радиус оси тороида, тем точнее, чем меньше поперечное сечение  $S_B$  сердечника. В данной работе определяется зависимость индуктивности  $L$  от величины магнитной проницаемости  $\mu$  феррита, из которого изготовлен сердечник.

Правильно объяснить магнитные свойства любого магнетика – ферромагнетика, парамагнетика или диамагнетика – можно только с помощью законов квантовой физики. В частности, феррит – это магнитно-упорядоченная среда, в которой магнитные моменты атомов выстраиваются строго вдоль одного направления под действием обменных сил квантовой природы, не имеющих аналога в классической физике. Ферриты отличаются от ферромагнетиков тем, что магнитные моменты атомов разного сорта направлены в разные стороны (рис.41, феррит  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ ).

При изменении магнитного поля в ферритах не возникают токи Фуко, поскольку ферриты не проводят электрический ток. По этой причине ферриты используются в качестве материала для изготовления сердечников трансформаторов, поскольку из-за большой величины магнитной проницаемости  $\mu$  позволяют создать большое магнитное поле, а в случае переменных токов не нагреваются, так как в них не происходит потеря энергии на выделение джоулева тепла, которое обязательно выделялось бы при затухании индукционных токов Фуко в проводящей ферромагнитной среде.

Магнитные моменты разных атомов  $\vec{p}_{ma}$  значительно отличаются по величине. Магнитные моменты групп соседних атомов, как и в ферромагнетиках, будут направлены в одну сторону (рис.41). Это приводит к появлению огромного магнитного момента  $\vec{p}_m = \sum \vec{p}_{ma}$  всего феррита (рис.42,а). Поэтому феррит делится на домены – участки кристаллической решетки с размером  $d \sim 10^{-4} \div 10^{-6}$  м, в которых магнитные моменты атомов под действием обменных сил ори-

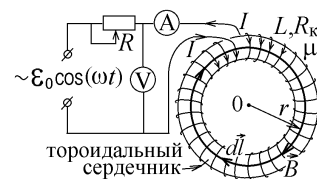


Рис.39

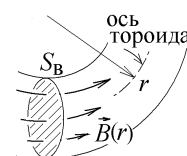


Рис.40

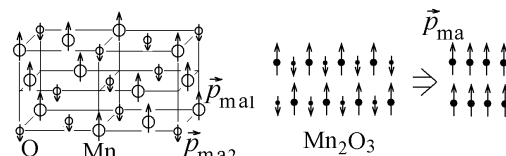


Рис.41



ентированы параллельно, но в соседних доменах их направления противоположны (рис.42,б). В результате индукция магнитного поля  $\vec{B}$  в феррите сильно уменьшена и практически равна нулю, если феррит не намагничен.

Без ферритового сердечника текущий по катушке ток  $I$  создаёт внутри неё, в воздушном пространстве, поле с индукцией  $B_I = \mu_0 IN / (2\pi r)$ . Магнитные моменты доменов в ферритовом сердечнике имеют в этом поле энергию  $W = -\vec{p}_m \cdot \vec{B}_I$ . Домены, ориентированные по полю, имеют меньшую энергию  $W_{\uparrow} = -p_{m\uparrow} B_I \cos 0^\circ = -p_{m\uparrow} B_I$ , чем домены, ориентированные против поля,  $W_{\downarrow} = -p_{m\downarrow} B_I \cos 180^\circ = +p_{m\downarrow} B_I$ . Домены с меньшей энергией начинают расти, а домены с большей энергией – уменьшаться в размерах. При этом атомы феррита не смещаются, а направления их магнитных моментов  $\vec{p}_{ma}$  слоями меняют направление (рис.42,в). Происходит перемещение стенок (границ) доменов. Не скомпенсированные магнитные моменты доменов создают дополнительное магнитное поле  $\vec{B}_d$ , которое складывается с магнитным полем тока:  $\vec{B} = \vec{B}_d + \vec{B}_I$ .

Дополнительное поле, созданное магнитными моментами атомов среды характеризуют вектором намагнитченности  $\vec{J} = \sum_{\text{ед } V} \vec{p}_{ma}$  – это сумма магнитных моментов атомов в единице объёма среды. В ферромагнетиках и ферритах

$\vec{B} = \vec{B}_I + \mu_0 \vec{J}$ , но между векторами  $\vec{B}_I$  и  $\vec{J}$  нет линейной зависимости. С ростом поля  $B_I$  скорость переориентации доменов вначале растёт, достигает максимума при  $B_I = B_K$  (соответствующее значение напряженности  $H_K = B_K / \mu_0$  называется коэрцитивной силой), а при больших величинах  $B_I$  все домены будут переориентированы по направлению поля  $\vec{B}_I$  (насыщение). Зависимость индукции поля  $B$  в феррите от величины  $B_I$  станет линейной (рис.43,а). Такая зависимость называется кривой намагничивания Столетова.

Считая, что поле в среде возрастает пропорционально величине магнитной проницаемости  $\mu$ ,  $\vec{B} = \mu \vec{B}_I$ , получаем зависимость  $\mu$  феррита от величины магнитного поля тока или от величины тока  $I$ , пропускаемого по виткам катушки (рис.43,б). При больших величинах  $I \rightarrow 1$ , т.е. феррит ведет себя как парамагнетик. Так как  $L \sim \mu$ , то экспериментально определяемый график  $L = L(I)$ , если пренебречь сопротивлением провода катушки  $R_K \approx 0$ , должен иметь ту же форму, что и график  $\mu = \mu(I)$  (рис.43,в).

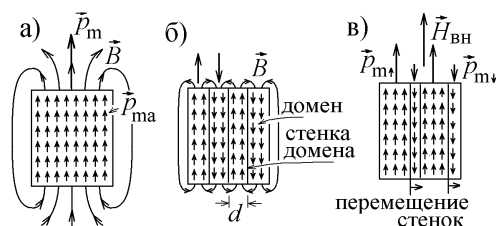


Рис.42

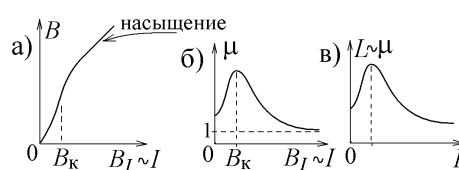


Рис.43

#### Порядок выполнения работы

1. Разберитесь в электрической схеме установки (рис.39). Определите цену деления каждого из измерительных приборов.
2. Включите установку в сеть.
3. Изменяя напряжение на тороиде с помощью потенциометра  $R$ , измерьте зависимость тока  $I$  от напряжения  $U$  (не менее 10 значений). Для замыкания цепи на установке служит кнопка  $S$ . Занесите полученные величины в таблицу.
4. Выключить установку из сети. Получите подпись преподавателя после завершения эксперимента.
5. По формуле (8) подсчитайте эквивалентную индуктивность тороида при всех снятых значениях тока и напряжения. Результаты занести в таблицу.
7. Постройте график зависимости  $L = f(I)$ .

#### Контрольные вопросы к лабораторной работе № 28

1. Сформулируйте теорему о циркуляции вектора магнитной индукции и с её помощью определите величину индукции  $B$  магнитного поля внутри тороидальной катушки с ферритовым сердечником. Одинакова ли величина  $B$  во всех точках сердечника?
2. Какая величина называется индуктивностью? В каких единицах она измеряется? Как связать индуктивность тороидальной катушки с величиной индукции магнитного поля внутри неё?
3. Какая величина называется магнитной проницаемостью ферритового сердечника? К какому значению она стремится, если феррит поместить в очень сильное магнитное поле?
4. Получите формулу индуктивности катушки. Почему в данной работе важна её зависимость от магнитной проницаемости сердечника?
5. Почему амперметр и вольтметр в данной работе измеряют не истинные, а эффективные (действующие) значения тока  $I$  и напряжения  $U$ ? Какая величина называется эффективным значением тока (напряжения)?
6. Запишите правило Кирхгофа для цепи, в которой катушка подключена к источнику переменной ЭДС, и получите с его помощью расчетную формулу (8).
7. Почему сердечник катушки изготовлен из феррита, а не из стали с большим значением магнитной проницаемости?
8. Почему феррит самопроизвольно делится на домены? Что такое домен?
9. Какая величина называется вектором намагнитченности?

|      | $I, A$ | $U, B$ | $L, Гн$ |
|------|--------|--------|---------|
| 1    |        |        |         |
| 2    |        |        |         |
| .... |        |        |         |
| 10   |        |        |         |

10. Сердечник из феррита находится во внешнем магнитном поле  $B_I$ , созданном током, текущим по катушке. Как найти индукцию магнитного поля в феррите? Почему она не меняется прямо пропорционально  $B_I$ ?
11. Объясните, как намагничивается феррит при увеличении тока  $I$  в катушке? Что происходит с доменами? Когда возникает насыщение? Что такое кривая намагничивания Столетова?
12. Объясните вид экспериментального графика  $L = L(I)$ , получаемого в данной работе. По какой причине индуктивность катушки зависит от тока  $I$ ? Каким получится график зависимости, если убрать сердечник?

#### Литература

1. Савельев И.В. Курс физики в 3-х тт.: Т. 2: Электричество - М.: Наука, 1970.- §§ 42-44, 50, 54, 55, 56, 59.
2. Колмаков Ю. Н., Пекар Ю. А., Лагун И. М. Электричество и магнетизм,- изд. ТулГУ. 2008, гл.7 §9, гл.9 §§4,6.
3. Колмаков Ю.Н., Пекар Ю.А., Лежнева Л.С. Электромагнетизм и оптика,- изд. ТулГУ. 2010, гл.I §§ 3,4-5.
4. Колмаков Ю. Н., Левин Д.М., Семин В.А. Основы физики конденсированных сред и физики микромира: Ч.1,  
- изд. ТулГУ. 2014, §§7.3-7.6.

## Работа №29. Исследование электрических затухающих колебаний с помощью осциллографа

**Цель работы:** ознакомление с методом получения затухающих электрических колебаний и определение параметров колебательного контура с помощью осциллографа.

### Теоретическое описание

Электрическая схема установки приведена на рис.44. Генератор создает импульсы напряжения  $U_{\text{и}}$  практически прямоугольной формы, которые с периодом  $T_{\text{и}}$  подаются на конденсатор электрического колебательного контура, подключенный тумблером  $K_1$ . Длительность импульса  $\tau$  очень мала ( $\tau \ll T_{\text{и}}$ , см.

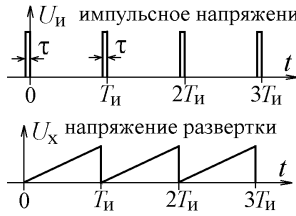


Рис.45

рис.45), но за это время конденсатор с ёмкостью  $C$  успевает зарядиться, и на его обкладках оказывается заряд  $q_0 = CU_0$ . Затем конденсатор разряжается и в цепи колебательного контура возникает переменный ток. На клеммы вертикальной развертки "Y" осциллографа подается напряжение  $U_y$ , создаваемое на концах катушки с индуктивностью  $L_0$  (см.рис.44). Получим зависимость этого напряжения от времени.

**Вывод расчетной формулы.** Электрический колебательный контур – это цепь, обладающая ёмкостью  $C$ , индуктивностью  $L$  и омическим сопротивлением  $R$  (рис.46). Генератор

импульсов подключается к этой цепи только на время зарядки конденсатора. Остальное время ( $T_{\text{и}} - \tau$ ) в цепи контура имеется единственная ЭДС самоиндукции  $\mathcal{E}_c$  в катушке  $L$ . Правило Кирхгофа для такого контура  $U_R + U_C = \mathcal{E}_c$ . После подстановки выражений для падения напряжения на сопротивлении  $U_R = IR$ , на конденсаторе  $U_C = q/C$ , для ЭДС самоиндукции  $\mathcal{E}_c = -L dI/dt$ , а также определения тока  $I = dq/dt$ , получаем уравнение собственных затухающих колебаний заряда на конденсаторе:

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = 0, \text{ где } \omega_0^2 = \frac{1}{LC}, \beta = \frac{R}{2L}. \quad (9)$$

Параметр  $\beta$  называют коэффициентом затухания колебаний.

Решение этого уравнения имеет вид  $q(t) = q_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t)$  (при  $t = 0$  заряд на конденсаторе максимален и равен

$q_0$ ).  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$  – циклическая частота затухающих колебаний. Их период  $T = 2\pi/\omega$ , а также скорость затухания колебаний зависит от величин ёмкости конденсаторов и сопротивлений резисторов, подключаемых тумблерами  $K_1$  и  $K_2$  (рис.44). В частности, при очень большой величине сопротивления  $R$  или большой величине ёмкости  $C$ , когда  $\omega_0^2 \leq \beta^2$ , или  $R \geq R_{\text{кр}} = 2\sqrt{L/C}$ , колебания возникать не могут (величина сопротивления  $R_{\text{кр}}$  называется критической).

Ток в цепи выразится как  $I(t) = dq/dt = -\beta q_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t) - \omega q_0 e^{-\beta t} \sin(\omega t)$ . Вводя обозначения

$$\sin \alpha = -\frac{\omega}{\sqrt{\omega^2 + \beta^2}}, \cos \alpha = \frac{\beta}{\sqrt{\omega^2 + \beta^2}}, \text{ учтем, что } \sqrt{\omega^2 + \beta^2} = \omega_0, \text{ и } \cos(\theta + \alpha) = \sin \alpha \sin \theta - \cos \alpha \cos \theta. \text{ Получаем}$$

$I(t) = q_0 \omega_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \alpha)$  – колебания тока в цепи контура опережает по фазе колебания напряжения  $U_C = q(t)/C$  на конденсаторе на величину  $\alpha$ .

В катушке индуктивности  $L$  создается магнитное поле с индукцией, величина которой пропорциональна величине тока, протекающего по виткам катушки,  $B \sim I(t)$ . Линии индукции пронизывают витки другой катушки с индуктивностью  $L_0$ , и создают в ней переменный магнитный поток, также пропорциональный величине тока  $\Phi_0 \sim B \sim I(t)$ .

Падение напряжения на концах катушки  $L_0$ , если пренебречь омическим сопротивлением её витков, будет равно ЭДС взаимной индукции  $\mathcal{E}_{\text{вз}} = -d\Phi_0/dt = -L_{\text{вз}} dI/dt$ , где  $L_{\text{вз}}$  – коэффициент взаимной индуктивности. Изменение тока в одном замкнутом контуре приводит к появлению ЭДС в другом, соседнем замкнутом контуре. Величину индуктивной связи между катушками (величину коэффициента  $L_{\text{вз}}$ ) обычно увеличивают, наматывая витки катушек на общий ферритовый сердечник с большой величиной магнитной проницаемости  $\mu$  (рис.46).

Подставляя полученное выше выражение для тока  $I(t)$ , находим

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\text{вз}} &= L_{\text{вз}} q_0 \omega_0 (\beta e^{-\beta t} \cos(\omega t + \alpha) + \omega e^{-\beta t} \sin(\omega t + \alpha)) = \\ &= L_{\text{вз}} q_0 \omega_0^2 e^{-\beta t} (\cos \alpha \cos(\omega t + \alpha) - \sin \alpha \sin(\omega t + \alpha)) = L_{\text{вз}} q_0 \omega_0^2 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \pi + 2\alpha). \end{aligned}$$

Напряжение, подаваемое на клеммы вертикальной развертки "Y",  $U_y = \mathcal{E}_{\text{вз}} = \frac{U_{y0} e^{-\beta t} \cos(\omega t + \delta)}{\text{амплитуда}}$ , где

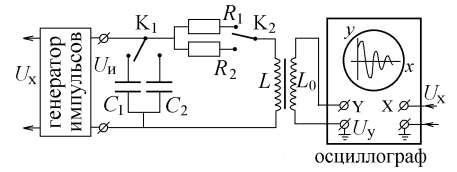


Рис.44

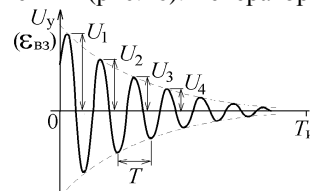


Рис.47

Рис.46

$U_{y0} = L_{вз} q_0 \omega_0^2$  (рис.47), меняется со временем по тому же закону, что и колебания заряда на конденсаторе, но сдвинуто по фазе на  $\delta = \pi + 2\alpha$ . На клеммы горизонтальной развертки “Х” осциллографа подается пилообразное напряжение  $U_x$ , период изменения которого совпадает с периодом появления импульсов  $T_n$  (рис.45). За это время колебания напряжения  $U_y$ , происходящие с меньшим периодом

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}} = 2\pi / \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \quad (10)$$

успевают затухнуть, и на экране осциллографа видна картина, показанная на рис.47.

Горизонтальная ось развертки калибрована в единицах времени, указанных на панели осциллографа, что позволяет определить временной интервал  $T$  между двумя соседними максимумами графика (рис.47), т.е. экспериментально определяемый период затухающих колебаний.

Затухание колебаний характеризуют величиной логарифмического декремента затухания  $\theta$  – это натуральный логарифм отношения амплитуды колебаний в момент времени  $t$  к амплитуде через период:

$$\theta = \ln \left( \frac{U_{y0} e^{-\beta t}}{U_{y0} e^{-\beta T} e^{-\beta T}} \right) = \ln(e^{+\beta T}) = \beta T. \text{ Подставляя (9) и (10) находим, что } \theta = \pi / \sqrt{\frac{L}{CR^2} - \frac{1}{4}} \quad (11)$$

Но можно воспользоваться другой формулой для вычисления  $\theta$ . Через каждый период амплитуда колебаний уменьшается в  $e^{\beta T}$  раз:  $\frac{U_1}{U_2} = \frac{U_2}{U_3} = \dots = \frac{U_{n-1}}{U_n} = e^{\beta T}$  (величины амплитуд  $U_n$  показаны на рис.47). Отсюда

$$\frac{U_1}{U_n} = \frac{e^{\beta T} \cdot e^{\beta T} \cdot \dots \cdot e^{\beta T}}{n-1 \text{ раз}} = e^{(n-1)\beta T}. \text{ Получили другую формулу для вычисления } \theta:$$

$$\theta = \frac{1}{n-1} \ln \left( \frac{U_1}{U_n} \right). \quad (12)$$

Однако, в радиотехнике используют другую величину, обратную к  $\theta$  и также характеризующую быстроту затухания электрических колебаний – добротность контура

$$Q = \pi / \theta. \quad (13)$$

Эта величина пропорциональна отношению запасенной в контуре энергии к энергии, теряемой за период  $T$  в виде джоулева тепла, выделяющегося на активном сопротивлении  $R$ . Чем выше добротность  $Q$  колебательного контура, тем медленнее затухают в нём электрические колебания. В приёмных радиотехнических устройствах контуры с большой добротностью используют для выделения и усиления электромагнитных сигналов с определенной частотой  $\omega$ , соответствующей резонансу колебаний.

Подставляя в определение добротности формулу (11), находим теоретическую расчетную формулу для вычисления добротности:

$$Q = \frac{\pi}{\theta} = \sqrt{\frac{L}{CR^2} - \frac{1}{4}}. \quad (14)$$

#### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с электрической схемой установки.
2. Подключить в контур конденсатор с ёмкостью  $C = C_1$  и резистор с сопротивлением  $R = R_1$  (рис.44). Включить установку в сеть. Включить осциллограф. Добиться на экране осциллографа изображения затухающих колебаний (рис.47).
3. Измерить величину периода колебаний  $T$  в делениях, нанесенных на экране осциллографа вдоль горизонтальной оси (это расстояние между соседними максимумами или минимумами кривой, рис.47). На панели осциллографа найти регулятор горизонтальной (временной) развертки, указывающий на цену одного деления в единицах времени (ms или  $\mu$ s). Умножив величину  $T$  в делениях на цену одного деления получить экспериментально определенную величину периода колебаний  $T_{\text{эсп}}$ .
4. Перерисовать кривую изображения затухающих колебаний (рис.47) с экрана осциллографа на лист миллиметровой бумаге в масштабе 1:1, тщательно соблюдая все размеры (или вначале сфотографировать кривую на экране, а затем распечатать полученную фотографию на компьютере).
5. Подключить в контур конденсатор с ёмкостью  $C = C_2$  и резистор с сопротивлением  $R = R_2$ . Величины ёмкостей и сопротивлений, а также величина индуктивности  $L$  указаны на установке, занести их в таблицу 1. Добиться на экране осциллографа нового изображения затухающих колебаний.
6. Повторить выполнение пунктов 3 и 4, получая новый график и новое значение  $T_{\text{эсп}}$ .
7. Выключить питание осциллографа и выключить установку.

Таблица 1

| $C$ , мкФ | $L$ , Гн | $R$ , Ом | $\omega_0$ , с <sup>-1</sup> | $\beta$ , с <sup>-1</sup> | $T_{\text{теор}}$ , с | $\theta_{\text{теор}}$ | $Q_{\text{теор}}$ |
|-----------|----------|----------|------------------------------|---------------------------|-----------------------|------------------------|-------------------|
|           |          |          |                              |                           |                       |                        |                   |
|           |          |          |                              |                           |                       |                        |                   |

8. По нарисованным на двух графиках кривым измерить линейкой амплитудные значения  $U_1, U_2, U_3, U_4, \dots$  в миллиметрах (эти значения отсчитываются от горизонтальной оси, соответствующей значению  $U = 0$ , к которой будут сходиться колебания, и которую надо нанести на графике). Занести их в таблицу 2.

Таблица 2.

| $C$ , мкФ | $L$ , Гн | $R$ , Ом | $n$ | $U_1$ , мм | $U_n$ , мм | $\theta$ | $\langle \theta \rangle = \theta_{\text{эксп}}$ | $T_{\text{эксп}}$ , с | $Q_{\text{эксп}}$ |
|-----------|----------|----------|-----|------------|------------|----------|---|-----------------------|-------------------|
|           |          |          | 2   |            |            |          |   |                       |                   |
|           |          |          | 3   |            |            |          |   |                       |                   |
|           |          |          | 4   |            |            |          |   |                       |                   |
|           |          |          | 2   |            |            |          |   |                       |                   |
|           |          |          | 3   |            |            |          |   |                       |                   |
|           |          |          | 4   |            |            |          |   |                       |                   |

9. По формуле (12) вычислить логарифмический декремент затухания  $\theta$  для  $n = 1, 2, 3$  (не менее трех раз для каждого из двух графиков).

10. Рассчитать его среднее значение, полученное в эксперименте  $\langle \theta \rangle = \theta_{\text{эксп}}$ . По формуле (13) вычислить добротность контура, найденную экспериментальным методом  $Q_{\text{эксп}} = \pi / \langle \theta \rangle$ . Результаты вычислений занести в таблицу 2.

11. По формулам (9), (10), (11) и (14) вычислить расчетные значения частоты  $\omega_0$ , коэффициента затухания  $\beta$ , периода колебаний  $T_{\text{теор}}$ , логарифмического декремента  $\theta_{\text{теор}}$  и добротности  $Q_{\text{теор}}$  для каждого из двух опытов. Результаты вычислений занести в таблицу 1.

12. Сравнить величины  $T$ ,  $\theta$  и  $Q$ , полученные экспериментальным методом (таблица 2) и вычисленных по теоретическим формулам (таблица 1).

#### Контрольные вопросы к лабораторной работе № 29

1. Какая цепь называется электрическим колебательным контуром?
2. Запишите правило Кирхгофа для замкнутой цепи, содержащей конденсатор с ёмкостью  $C$ , катушку с индуктивностью  $L$  и резистор  $R$  и приведите его к дифференциальному уравнению собственных затухающих колебаний заряда на конденсаторе.
3. Запишите выражения для коэффициента затухания, циклической частоты и периода таких колебаний. Как они зависят от параметров  $C$ ,  $L$  и  $R$ ?
4. Что происходит с величиной периода (частоты) собственных колебаний при увеличении сопротивления  $R$ ? при увеличении ёмкости  $C$ ?
5. Чему равно критическое сопротивление контура  $R_{\text{кр}}$ ? Что происходит с колебаниями при  $R \geq R_{\text{кр}}$ ?
6. Запишите выражение зависимости колебаний заряда  $q$  на конденсаторе и падения напряжения  $U_C$  на его обкладках от времени.
7. Получите зависимость величины тока  $I$  в контуре от времени. Чему равен сдвиг фаз между колебаниями  $U_C$  и  $I$ ?
8. Как изменяются со временем амплитуды колебаний  $U_C$  и  $I$ ?
9. Какая величина называется логарифмическим декрементом затухания колебаний  $\theta$ ? Выразите величину  $\theta$  через параметры  $C$ ,  $L$  и  $R$ .
10. В электрическом колебательном контуре сопротивление  $R$  и индуктивность  $L$  увеличили в два раза. Во сколько раз надо изменить ёмкость  $C$ , чтобы логарифмический декремент затухания колебаний не изменился?
11. Как вычислить добротность колебательного контура? Что характеризует величина добротности?
12. Как определяется величина ЭДС взаимной индукции? Какова роль этой ЭДС в данной работе?
13. Объясните, как возникает картина затухающих колебаний на экране осциллографа? Какова роль генератора прямоугольных импульсов?
14. Объясните, как определить величину логарифмического декремента затухания  $\theta$  по картине, наблюдаемой на экране?
15. Каким образом по данной картине можно определить величину периода затухающих колебаний?
16. Период собственных затухающих колебаний в электрическом колебательном контуре  $T = 2$  мс. За время  $\Delta t = 10$  мс амплитуда таких колебаний уменьшается в  $e = 2,71828$  раз. Чему равен логарифмический декремент затухания колебаний?
17. В контуре с заданными параметрами  $C$  и  $R$  изменяют индуктивность  $L$ . При каком значении  $L$  циклическая частота собственных колебаний имеет максимальную величину? Чему равна  $\omega_{\text{max}}$ ?

#### Литература

1. Савельев И.В. Курс физики в 3-х тт.: Т. 2: Электричество - М.: Наука, 1970.- §§ 59, 62, 99, 100.
2. Колмаков Ю.Н., Пекар Ю.А., Лежнева Л.С. Электромагнетизм и оптика,- изд. ТулГУ. 2010, гл. I §§4,5, гл.3 §2.

## Работа №30. Определение характеристик колебательного контура методом резонанса

Цель работы: экспериментальное исследование особенностей явления резонанса в электрическом колебательном контуре, условий его возникновения и определение основных характеристик колебательного контура методом резонанса.

### Теоретическое описание

Электрическая схема лабораторной установки показана на рис.48. Источник переменной ЭДС с амплитудой  $\mathcal{E}_0$  и циклической частотой  $\omega$  включен в цепь электрического колебательного контура, состоящую из катушки с индуктивностью  $L$ , конденсатора с переменной ёмкостью  $C$  и резистора с сопротивлением  $R$ .

Правило Кирхгофа для такой замкнутой цепи имеет вид  $U_R + U_C = \mathcal{E}_c + \mathcal{E}_0 \cos(\omega t)$ , где  $U_R = IR$  – падение напряжения на резисторе,  $U_C = q/C$  – падение напряжения на конденсаторе с зарядом  $q$ ,  $\mathcal{E}_c = -L di/dt$  – ЭДС самоиндукции, возникающая в катушке. Подставляя выражение тока  $I = dq/dt$ , созданного изменением заряда на конденсаторе, получаем уравнение вынужденных электрических колебаний

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = \frac{\mathcal{E}_0}{L} \cos(\omega t), \quad \text{где } \omega_0^2 = \frac{1}{LC}, \quad \beta = \frac{R}{2L}.$$

Подставляя в это уравнение выражение для установившихся колебаний заряда, происходящих с частотой внешней ЭДС и с амплитудой  $A$ , не зависящей от времени,  $q = A \cos(\omega t - \varphi)$ , приходим к равенству

$$\begin{aligned} A\omega^2 (-\cos(\omega t - \varphi)) + 2\beta A\omega (-\sin(\omega t - \varphi)) + \omega_0^2 A \cos(\omega t - \varphi) &= \frac{\mathcal{E}_0}{L} \cos(\omega t) \\ = \cos(\omega t - \varphi + \pi) &= \cos(\omega t - \varphi + \pi/2) \end{aligned}$$

Три колебания с одинаковой частотой  $\omega$  и разными начальными фазами в левой части этого уравнения складываем методом векторной диаграммы (рис.49), получая в результате сложения вектор, соответствующий правой части. Из прямоугольного треугольника на этом рисунке следует,

что  $A^2(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\beta A\omega)^2 = \frac{\mathcal{E}_0^2}{L^2}$ ;  $\tan \varphi = \frac{2\beta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}$ . Отсюда видно, что амплитуда вынужденных колебаний заряда на конденсаторе зависит от частоты переменной ЭДС:

$$A(\omega) = \frac{\mathcal{E}_0/L}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2}}.$$

Такая же зависимость от частоты  $\omega$  будет у амплитуды колебаний напряжения на конденсаторе  $U_C = q/C$  (рис.50,а).

Находя ток в цепи,  $I = dq/dt = -A\omega \sin(\omega t - \varphi) = I_0 \cos(\omega t - \varphi + \pi/2)$ , видим, что колебания тока опережают колебания напряжения  $U_C$  по фазе на  $\pi/2$ . Амплитуда тока  $I_0(\omega) = A(\omega)\omega = \frac{\mathcal{E}_0}{\frac{L}{\omega} \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2}} = \frac{\mathcal{E}_0}{\sqrt{\left(\frac{1}{C\omega} - L\omega\right)^2 + R^2}}$

также зависит от частоты  $\omega$  (рис.50,б). Её связывают с амплитудой ЭДС внешнего источника формулой, аналогичной закону Ома в цепи постоянного тока:  $I_0 = \mathcal{E}_0/Z$ , где величину

$$Z(\omega) = \sqrt{\left(\frac{1}{C\omega} - L\omega\right)^2 + R^2}$$

называют полным сопротивлением цепи переменному току. Записанная формула связывает амплитуды тока и ЭДС. Сопротивление  $X_C = 1/\omega C$  называется ёмкостным сопротивлением, а  $X_L = \omega L$  – индуктивным сопротивлением (эти сопротивления называют реактивными).

Амплитуды падения напряжения на конденсаторе  $U_{C0} = q_{\max}/C = X_C I_0$  и на катушке индуктивности (если  $R_{\text{катушки}} = 0$ ),  $U_{L0} = |-L di/dt|_{\max} = X_L I_0$  связаны с амплитудой тока  $I_0$  реактивными сопротивлениями. Но, поскольку колебания  $U_C$  и  $U_L$  сдвинуты по фазе относительно колебаний тока на величину  $\pi/2$ , то средняя мощность тока для них равна нулю. Например,  $P_C = \frac{1}{T} \int_0^T U_C I dt \sim \int_0^T \cos(\omega t - \varphi) \sin(\omega t - \varphi) dt = 0$ . При протекании переменного тока на реактивных сопротивлениях не выделяется джоулево тепло.

На обычном омическом сопротивлении  $R$  резистора, которое называется активным сопротивлением, выделяется средняя мощность  $P_R = \frac{1}{T} \int_0^T I^2 R dt = \frac{1}{T} \int_0^T I_0^2 R \cos^2(\omega t - \varphi) dt = \frac{1}{2} I_0^2 R$ . Амперметр в цепи (рис.48) измеряет не амплитудное,

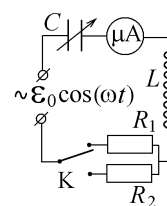


Рис.48

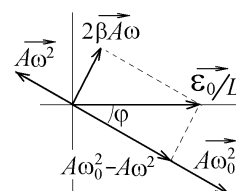


Рис.49

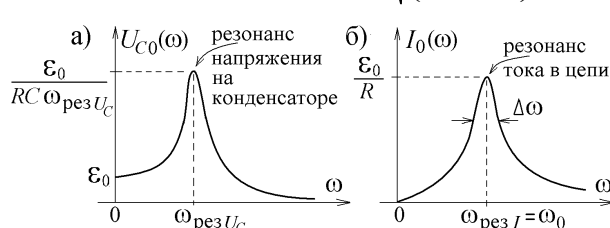


Рис.50

а эффективное или действующее значение тока  $I_{\text{эфф}} = I_0 / \sqrt{2}$ . Это величина такого постоянного тока, который выделяет в цепи ту же мощность, что и переменный ток с амплитудой  $I_0$ .

Из рис.50 видно, что при некоторой частоте внешней ЭДС наблюдается явление резонанса – резкое увеличение амплитуды тока в цепи или амплитуды напряжения на конденсаторе. Такая частота называется резонансной частотой  $\omega_{\text{рез}}$  и определяется из условия максимума. Для напряжения на конденсаторе амплитуда  $U_{C0} = A(\omega)/C$  максимальна

при минимальном значении знаменателя:  $\frac{d}{d\omega^2} \left( (\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2 \right) = 0$ , что дает  $\omega_{\text{рез}U_C} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{2L^2}}$  – резонансная частота для амплитуды заряда или напряжения на конденсаторе. Амплитуда тока максимальна, если  $\frac{1}{C\omega} - L\omega = 0$ , т.е.  $\omega_{\text{рез}I} = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  – резонансная частота для амплитуды тока в цепи.

Обычно резонанс используется в контурах с очень малым коэффициентом затухания  $\beta \ll \omega_0$ , для которых  $\omega_{\text{рез}U_C} \approx \omega_{\text{рез}I} = 1/\sqrt{LC}$ . Резонансные свойства колебательного контура определяются двумя характеристиками. Это волновое или характеристическое сопротивление контура  $\rho$  – величина его ёмкостного (или индуктивного) сопротивления при резонансной частоте:  $\rho = X_{C_{\text{рез}}} = X_{L_{\text{рез}}} = L\omega_{\text{рез}I}$ , т.е.  $\rho = \sqrt{L/C}$ .

Другая характеристика – добротность  $Q$  контура. Это – отношение амплитуды напряжения на индуктивности (или на конденсаторе) к амплитуде ЭДС при резонансе:  $Q = \frac{U_{L0}}{\varepsilon_0} = \frac{X_L I_0}{\varepsilon_0} = \frac{L\omega_{\text{рез}} I_0}{I_0 R}$ , т.е.  $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{\rho}{R}$ .

Чем больше добротность, тем выше и уже ширина резонансных кривых на рис.50. Ширина  $\Delta\omega$  резонансной кривой на высоте  $0,7 \cdot I_{0\text{max}}$  приблизительно равна  $\Delta\omega \approx \omega_0/Q \approx R/L$  (рис.50,б). В приемных устройствах надо использовать контуры с очень большой добротностью и малым затуханием колебаний, чтобы выделить и усилить сигнал с определенной частотой, попадающей в интервал  $\Delta\omega$ . В технике добротность определяют как величину, пропорциональную отношению запасенной в контуре энергии к энергии, теряемой за период  $T$  в виде джоулева тепла, выделяющегося на активном сопротивлении  $R$ :  $Q \sim \frac{LI_0^2}{2} / \left( \frac{RI_0^2}{2} T \right)$ .

В данной работе источник ЭДС имеет постоянную частоту  $\omega = 2\pi\nu$ , где  $\nu = 50$  Гц. Строится зависимости тока в цепи от переменной ёмкости  $C$  включенного в цепь конденсатора. При выполнении условия резонанса тока  $\omega = 1/\sqrt{LC}$  или  $C_{\text{рез}} = 1/(L\omega^2)$  амплитуда тока будет максимальна (рис.51), что позволяет рассчитать:

$$\text{индуктивность цепи} \quad L = 1/(C_{\text{рез}}\omega^2), \quad (15) \text{ её}$$

$$\text{волновое сопротивление} \quad \rho = \sqrt{L/C_{\text{рез}}} \quad (16)$$

$$\text{и добротность колебательного контура} \quad Q = \rho/R. \quad (17)$$

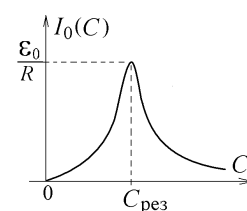


Рис.51

#### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться со схемой установки (рис.48).
2. Включить установку и переключателем подключить в цепь резистор с сопротивлением  $R_1$  (величины сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  указаны на установке).
3. Снять резонансную кривую, т.е. изменяя значения емкости конденсатора  $C$ , измерять показания микроамперметра, который показывает эффективное значение тока  $I_{\text{эфф}}$ , и данные заносить в таблицу 1.
4. Переключателем включить в контур другой резистор с сопротивлением  $R_2$  и снять вторую резонансную кривую, повторяя действия пункта 3.

Таблица 1.

|                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|-------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| Деления на конденсаторе             |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $C$ , пФ                            |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $I_{\text{эфф}}$ , мкА (для $R_1$ ) |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $I_{\text{эфф}}$ , мкА (для $R_2$ ) |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

5. По данным таблицы 1 в одних координатных осях (на одном листе) построить два графика резонансных кривых  $I_{\text{эфф}} = f(C)$  для двух сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$ .

6. По двум резонансным кривым определить значения емкости  $C_{\text{рез}}$ , соответствующие максимальному значению тока  $I_{\text{эфф}} = I_0/\sqrt{2}$ .

7. Определить индуктивность контура  $L$  по формуле (15). Резонансная частота для тока в данном случае совпадает с частотой переменного тока в цепи:  $\omega_{\text{рез}} = 2\pi\nu_0$ . Частота этого тока  $\nu_0$  указана на установке. При аккуратных измерениях величины рассчитанной индуктивности  $L$  в пределах погрешностей должны совпадать.

8. Рассчитать волновое сопротивление контура  $\rho$  по формуле (16).

9. Рассчитать добротность контура  $Q$  по формуле (17).

10. Все результаты вычислений занести в таблицу 2.

Таблица 2.

| $C_{\text{рез}}, \text{ пФ}$ | $\omega_{\text{рез}}, \text{ с}^{-1}$ | $L, \text{ Гн}$ | $R, \text{ Ом}$ | $\rho, \text{ Ом}$ | $Q$ |
|------------------------------|---------------------------------------|-----------------|-----------------|--------------------|-----|
|                              |                                       |                 |                 |                    |     |
|                              |                                       |                 |                 |                    |     |

#### Контрольные вопросы к лабораторной работе № 30

1. Какая цепь называется электрическим колебательным контуром?

2. Нарисуйте замкнутую цепь, содержащую конденсатор с ёмкостью  $C$ , катушку с индуктивностью  $L$ , резистор  $R$  и источник тока с переменной

ЭДС  $\mathcal{E}_0 \cos(\omega t)$ . Запишите правило Кирхгофа с учетом ЭДС самоиндукции в катушке и приведите его к дифференциальному уравнению вынужденных электрических колебаний.

3. Какова амплитуда и частота вынужденных колебаний? С помощью метода векторной диаграммы получите выражения для амплитуды напряжения  $U_C$  на конденсаторе и амплитуды силы тока  $I$  в цепи.

4. Какова разность фаз между вынужденными колебаниями  $U_C$  и  $I$ ?

5. Какие величины называются индуктивным, ёмкостным, активным и полным сопротивлением цепи переменному току?

6. Какая величина называется эффективным (действующим) значением тока (напряжения)? На каких элементах цепи выделяется эффективная мощность?

7. Какое явление называется резонансом? Что такое резонансная частота и как её вычислить?

8. Резонанс какой величины наблюдается в данной работе?

9. Найти резонансную частоту для колебаний заряда на конденсаторе.

10. Найти резонансную частоту для колебаний силы тока в цепи.

11. Частоту внешнего источника ЭДС постепенно увеличивают. Резонанс какой величины,  $U_C$  или  $I$ , наступит раньше?

12. Какая величина называется волновым сопротивлением контура? Как её вычислить?

13. Какая величина называется добротностью электрического колебательного контура?

14. Что происходит с кривой амплитудно-частотной характеристики тока (рис.50,б) при увеличении активного сопротивления  $R$  цепи?

15. Почему в радиоприемниках надо использовать приемный контур с высокой добротностью?

#### Литература

1. Савельев И.В. Курс физики в 3-х тт.: Т. 2: Электричество - М.: Наука, 1970.- §§ 59, 100, 101.

2. Колмаков Ю.Н., Пекар Ю.А., Лежнева Л.С. Электромагнетизм и оптика,- изд. ТулГУ. 2010, гл.1 §4, гл.3 §§2-4.