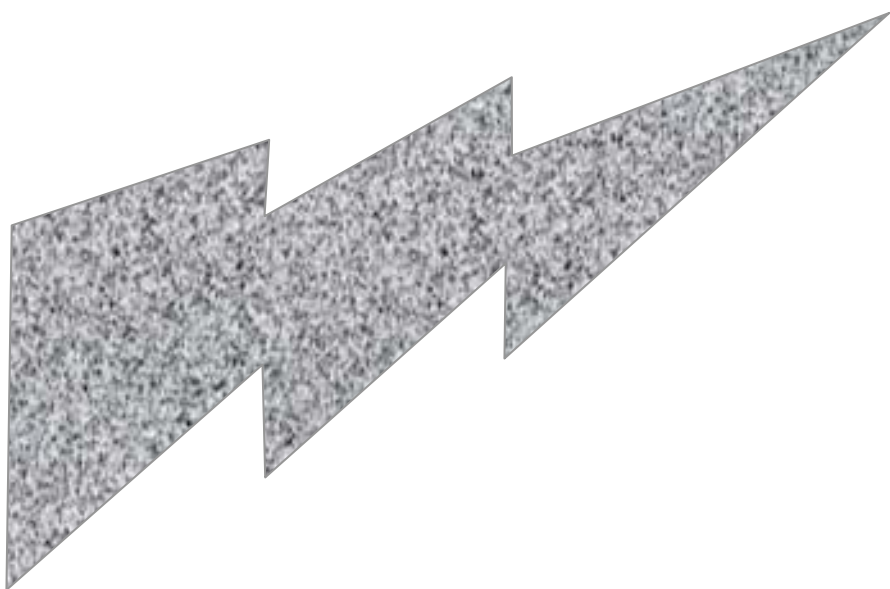


# ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ



УДК 535.338 (076.5)  
ББК В36я73-5  
Э45

**ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ**

Рецензент  
Доктор педагогических наук, профессор  
*Н.Я. Молотков*

Составители:  
*А.М. Савельев, В.И. Барсуков, Ю.П. Ляшенко*

Э45 Электромагнетизм: Лабораторные работы / Сост.: А.М. Савельев, В.И. Барсуков, Ю.П. Ляшенко. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. 32 с.

Представлены методические указания и описание лабораторных установок, используемых при выполнении четырех лабораторных работ по разделу курса общей физики "Электромагнетизм". В каждой работе дано теоретическое обоснование соответствующих методов экспериментального решения поставленных задач, а также методики обработки полученных результатов.

Работы предназначены для студентов 1 – 2 курсов всех специальностей инженерного профиля и форм обучения.

УДК 535.338 (076.5)  
ББК В36я73-5

© Тамбовский государственный  
технический университет  
(ТГТУ), 2004

Министерство образования Российской Федерации  
Тамбовский государственный технический университет

## **ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ**

Лабораторные работы  
для студентов 1 – 2 курсов всех специальностей  
инженерного профиля и форм обучения

Тамбов  
Издательство ТГТУ  
2004

Учебное издание

## ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

Лабораторные работы

Составители:

**Савельев** Александр Михайлович,  
**Барсуков** Владимир Иванович,  
**Ляшенко** Юрий Петрович

Редактор З.Г. Чернова  
Компьютерное макетирование М.А. Филатовой

Подписано в печать 11.02.04

Формат 60 × 84 / 16. Бумага газетная. Печать офсетная.  
Гарнитура Times New Roman. Объем: 1,86 усл. печ. л.; 1,8 уч.-изд. л.  
Тираж 300 экз. С. 74

Издательско-полиграфический центр  
Тамбовского государственного технического университета,  
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

## СНЯТИЕ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ ЖЕЛЕЗА ПО МЕТОДУ СТОЛЕТОВА

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

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

### Методические указания

Примененный А.Г. Столетовым метод основан на измерении магнитного потока  $\Phi$  в тороиде с помощью баллистического гальванометра.

Магнитный поток в тороиде (железном кольце) создается первичной обмоткой (рис. 1), которая имеет  $N_1$  витков, равномерно намотанных вдоль всего кольца. При пропускании тока  $i$  по обмотке  $N_1$ , возникает магнитное поле, напряженность которого

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

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

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

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

**Рис. 1**

вызывает в ней возникновение ЭДС индукции, величина которой определяется соотношением

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

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

$$i_i = \frac{\varepsilon_i}{R_{\text{н}}} = -\frac{2BS}{\Delta t R_{\text{н}}} N_2, \quad (3)$$

где  $\Delta t$  – время изменения магнитного потока,  $R_{\text{н}}$  – полное сопротивление вторичной цепи.

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

$$\Delta q = i_i \Delta t = -\frac{2BS}{R_{\text{н}}} N_2, \quad (4)$$

которое измеряется с помощью баллистического гальванометра, при этом

$$\Delta q = C_{\text{г}} n; \quad (5)$$

здесь  $C_{\text{г}}$  – баллистическая постоянная гальванометра;  $n$  – отброс светового "зайчика" по шкале гальванометра.

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

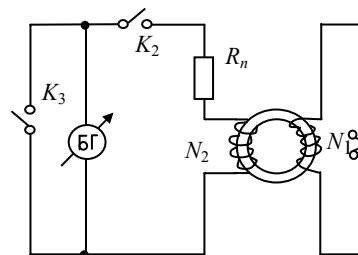
$$B = \frac{n C_{\text{г}} R_{\text{н}}}{2 S N_2}. \quad (6)$$

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

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

и намагниченность

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



Важной характеристикой магнетика (в работе тороид) является физическая величина, называемая относительной магнитной проницаемостью,

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

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

Качественные характеристики зависимостей вектора намагниченности  $\vec{I}$ , вектора индукции  $\vec{B}$  и относительной магнитной проницаемости  $\mu$  от изменений внешнего намагничивающего поля  $\vec{H}$  приведены на рис. 2.

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

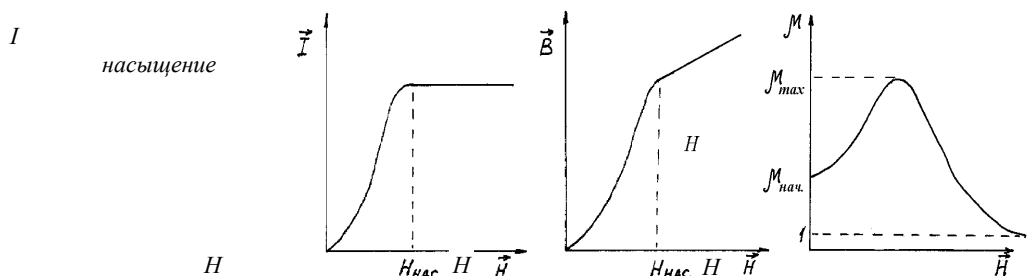


Рис. 2

С помощью реостатов  $R$ , включенных в схему (рис. 1), меняется ток  $i$  в первичной катушке; двойным ключом  $K$  осуществляется подключение этой обмотки к источнику питания постоянным током 12 В, а также путем его перебрасывания из одного положения в другое, за счет изменения направления тока в катушке  $N_1$ , перемагничивание и размагничивание тороида. Ключ  $K_1$  дополнительно замыкает и размыкает первичную цепь. Ключ  $K_2$  во вторичной цепи необходим для ее размыкания во время установки тока в первичной обмотке и при размагничивании тороида. В момент измерения отброса светового "зайчика" ключ  $K_2$  должен быть замкнут.

### Порядок выполнения работы

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

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

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

4 При нейтральном положении ключа  $K$  ручку реостата сдвиньте влево до упора. Поставьте ключ  $K$  в верхнее положение. По амперметру выставьте минимальный ток ( $\sim 0,05$  А). Ключ  $K_3$  разомкните, ключ  $K_2$  замкните и быстро перебросьте ключ  $K$  сверху вниз, одновременно регистрируя максимальное отклонение светового "зайчика" баллистического гальванометра (если исходное значение "зайчика" близко к нулю шкалы гальванометра и "зайчик" отклоняется влево, в дальнейшем, ключ  $K$  следует перебрасывать снизу вверх). Величину тока и отклонение "зайчика"  $(n - n_0) \times 10$  или  $(n - n_0) \times 20$  (указано на гальванометре) занесите в табл. 1.

5 Разомкните ключ  $K_2$ . Реостатом увеличьте ток до 0,1 А. Замкните ключ  $K_2$ , быстро перебросьте ключ  $K$  сверху вниз (снизу вверх) и зафиксируйте максимальное отклонение светового "зайчика". С учетом  $n_0$  данные занесите в табл. 1.

6 Постепенно увеличивая ток, в начале через 0,05 А до 0,3 А, а далее через 0,1 А до 1,2 ... 1,5 А и, повторяя операции п. 5, произведите не менее 15 – 18 опытов. Значения токов ( $n = 15 - 18$ ) и соответствующие им отклонения "зайчика" запишите в табл. 1.

7 По окончании работы замкните ключ  $K_3$ , ключи  $K_1$  и  $K_2$  разомкните. Удалите вилки шнуров питания из розеток "+12 В-" и "220 В".

Таблица 1

№ п/п	$i_n$ , А	$(n-n_0) \times 10$ или $[(n-n_0) \times 20]$	$H_n$ , А/ м	$B_n$ , Тл	$I_n$ , А/ м	$\mu$
1						
...						
15						

### Обработка результатов измерений

- По формуле (1) рассчитайте величины напряженностей  $H_n$  для всех значений токов  $i_n$ ;
- По формуле (6) найдите значения индукции  $\vec{B}_n$  магнитного поля тороида для соответствующих величин напряженностей  $H_n$ ;
- По формулам (7) и (8) рассчитайте намагниченность  $\vec{I}$  и относительную магнитную проницаемость  $\mu$  для различных значений магнитных полей. Все полученные данные занесите в табл. 1.
- По результатам расчетов постройте графики зависимостей:  

$$\vec{B} = f_1(\vec{H}); \quad \vec{I} = f_2(\vec{H}); \quad \mu = f_3(\vec{H}).$$
- Произведите расчет относительной и абсолютной ошибок для одной из пар величин  $\vec{H}$  и  $\vec{B}$ .
- Проанализируйте полученные зависимости и сделайте выводы о характере и интенсивности намагничивания используемого ферромагнетика.

### Контрольные вопросы

- Что такое намагничивание магнетика?
  - Чем отличаются диа-, пара- и ферромагнитные вещества и какое различие в характере их поведения в однородном магнитном поле?
  - Используя полученную кривую намагничивания, объясните физический смысл процессов, происходящих в ферромагнетике в меняющемся магнитном поле.
  - Что такое и как меняются магнитная проницаемость и магнитная восприимчивость ферромагнетика в ходе его намагничивания?
  - Поясните физический смысл метода А.Г. Столетова по изучению намагничивания железа.
  - Выведите основные расчетные формулы.
- Литература: [1, 3, 6, 9, 12].

## Лабораторная работа 2

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА "МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА"

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

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

### Методические указания

В основе одного из экспериментальных методов определения удельного заряда электрона (отношение заряда электрона к его массе  $e/m$ ) лежат результаты исследований движения заряженных частиц во взаимно перпендикулярных магнитном и электрическом полях. При этом траектория движения зависит от отношения заряда частицы к ее массе. Название применяемого в работе метода обусловлено тем, что подобное движение электронов в магнитном и электрическом полях такой же конфигурации осуществ-

ляется в магнетронах – приборах, используемых для генерации мощных электромагнитных колебаний сверхвысокой частоты.

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

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

или

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

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

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

Выражая величину удельного заряда из (1), получаем

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

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

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

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

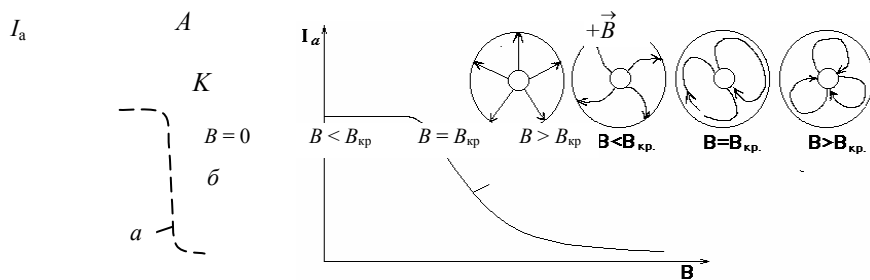


Рис. 1

Следует отметить, что на самом деле траектории движения электронов в магнитном поле уже не являются окружностями, а линиями с переменным радиусом кривизны. Это объясняется тем, что скорость электрона непрерывно меняется за счет ускорения, сообщаемого ему силами электрического поля. По-

этому точный расчет траектории электронов довольно сложен. Однако при радиусе анода  $r_a$  гораздо большем, чем радиус катода ( $r_a \gg r_k$ ) полагают, что основное увеличение скорости электронов под действием электрического поля происходит в области близкой к катоду, где напряженность электрического поля максимальна, а значит, и наибольшее ускорение, сообщаемое электронам. Дальнейший путь электрон пройдет почти с постоянной скоростью, и его траектория будет близка к окружности.

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

$$r_{кр} = \frac{r_a}{2}. \quad (4)$$

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

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

где  $U_a$  – разность потенциалов между анодом и катодом лампы.

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

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

Уточненный расчет с учетом радиуса катода  $r_k$  дает соотношение для определения удельного заряда электрона:

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

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

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

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

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

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

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

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

В связи с этим, критические условия для разных электронов достигаются при разных значениях тока соленоида, что приводит к сглаживанию кривой  $I_a = f(I_c)$ . Так как, согласно распределению Максвелла, из всего потока электронов, испускаемых катодом, большая часть имеет начальную скорость близкую к вероятной для определенной температуры катода, то наиболее резкий спад сбросовой характеристики наблюдается при достижении током соленоида критического значения  $(I_c)_{кр}$  именно для этой группы электронов. Поэтому для определения значения критического тока применяют метод графического дифференцирования. С этой целью на графике зависимости  $I_a = f(I_c)$  при тех же значениях тока соленоида строят зависимость

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

где  $\Delta I_a$  – приращение анодного тока при соответствующем изменении тока соленоида  $\Delta I_c$ .



Примерный вид сбросовой характеристики  $I_a = f(I_c)$  (а) и функции  $\frac{\Delta I_a}{\Delta I_c} = f(I_c)$  (б) показан на рис. 2.

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

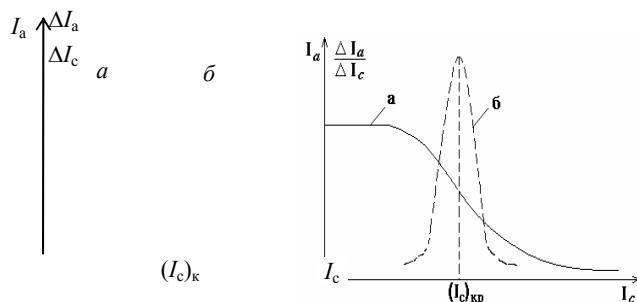


Рис. 2

### Описание установки

Установка собрана на лампе 6E5C, которая обычно используется в качестве электронного индикатора. Электрическая схема установки представлена на рис. 3, где ВУП – 2М – выпрямитель; R – потенциометр 0...30 Ом; A – амперметр 0 ... 2А; mA – миллиамперметр – 0 ... 2 мА; V – вольтметр 0 ... 100 В

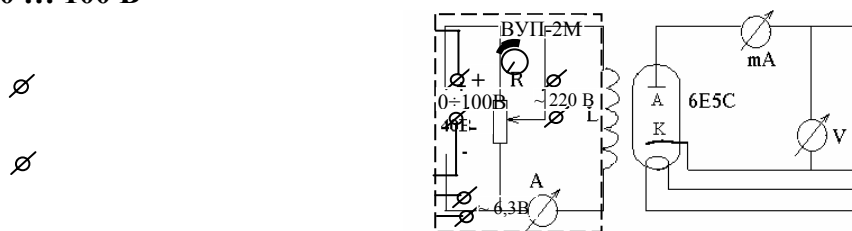


Рис. 3

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

Соленоид L через потенциометр R запитывается от источника постоянного тока, выведенного на розетку  $\pm 40$  В, укрепленную также на лабораторном столе. Ток соленоида измеряется амперметром с пределами

0...2 А, анодный ток фиксируется миллиамперметром с пределами 0...2 мА, а анодное напряжение – вольтметром с пределами измерения 0...150 В.

### Порядок выполнения и обработка результатов

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

2 Подсоедините выпрямитель ВУП-2М к розетке "220 В", а выходы потенциометра R к розетке "+40 В". Проверьте подключение накала лампы к клеммам выпрямителя "~6,3 В".

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

4 При нулевом токе в соленоиде отметьте максимальное значение анодного тока  $I_{amax}$ . Затем, увеличивая с помощью потенциометра R ток в соленоиде  $I_c$  через определенный интервал (например,  $\Delta I_c =$

0,1 А), каждый раз фиксируйте величину анодного тока. Сделайте не менее 15...18 измерений. Полученные величины  $I_c$  и  $I_a$  занесите в табл. 1.

5 Поставьте по вольтметру другое заданное напряжение  $U_{a_2}$  и повторите все операции по п. 4. Новые данные внесите в табл. 2. Аналогичные измерения проведите и для напряжения  $U_{a_3}$ , а полученные замеры занесите в табл. 3.

6 Для каждого значения анодного напряжения постройте графические зависимости  $I_a = f(I_c)$ . На эти же графики нанесите зависимости производной анодного тока  $dI_a$  от тока соленоида, т.е.  $\frac{dI_a}{dI_c} = f(I_c)$  и по ним определите критические величины тока соленоида  $(I_c)_{кр}$ , как схематично показано на рис. 2.

Таблицы 1–3

№ п/п	Ток соленоида, $I_c$ , А	Ток анода $I_a$ , mA	Приращение тока соленоида, $\Delta I_c$ , А	Приращение анодного тока, $\Delta I_a$ , mA	$\frac{\Delta I_a}{\Delta I_c}$	$(I_c)_{кр}$ , А	$B_{кр}$ , Тл	$\frac{e}{m}$ , Кл/кг
Напряжение анод – катод $U_{a_1}$								
1								
...								
18								
Напряжение анод – катод $U_{a_2}$								
1								
...								
18								
Напряжение анод – катод $U_{a_3}$								
1								
...								
18								

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

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

9 Рассчитайте относительную погрешность при определении искомой величины  $e/m$  по формуле

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

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

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

11 Проанализируйте полученные результаты и сделайте выводы.

### Контрольные вопросы

1 При каких условиях траектория движения заряженной частицы, находящейся в магнитном поле, является окружностью?

2 Расскажите об устройстве установки и сути "метода магнетрона" для определения удельного заряда электрона.

3 Что такое критический ток соленоида, критическое значение магнитной индукции?

4 Объясните траектории движения электронов от катода к аноду при токе соленоида  $I_c < I_{кр}$ ,  $I_c = I_{кр}$ ,  $I_c > I_{кр}$ .

5 Выведите формулу (6) и (8).

6 Объясните принципиальное различие идеальной и реальной сбросовых характеристик электронной лампы.

## ИЗУЧЕНИЕ СОБСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ В КОНТУРЕ

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

**Приборы и принадлежности:** электронный генератор кратковременных прямоугольных импульсов, периодически заряжающий конденсатор контура; система различных по емкости конденсаторов, батарея из последовательно соединенных катушек индуктивности, набор резисторов, электронный осциллограф, мостик Уитстона, переключатели, ключи.

### Методические указания

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

Если конденсатор зарядить, а возникнут электромагнитные разряды и в контуре пропорциональное ему магнитное приводит к возникновению в

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

В результате этого (обратите разряд конденсатора конденсатор полностью разрядится, ЭДС начинает поддерживать ток в прежнем направлении. В итоге происходит перезаряд конденсатора, т.е. первоначально положительно заряженная пластина конденсатора становится отрицательно заряженной и наоборот. Затем процесс разряда начнется снова, но в обратном направлении. Эти процессы периодические.

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

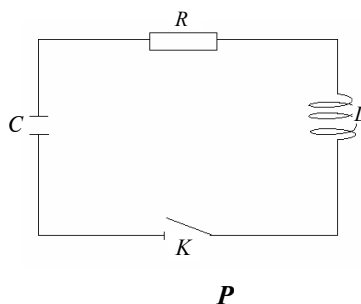
Во время колебательного процесса происходит переход энергии из одной формы в другую. При колебаниях груза потенциальная энергия растянутой (или сжатой) пружины переходит в кинетическую энергию движущегося груза. В случае электромагнитных колебаний в контуре при разряде конденсатора его электрическая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

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

$$d\left(\frac{q^2}{2c} + \frac{LI^2}{2}\right) = -I^2 R dt, \quad (2)$$

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

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



затем замкнуть ключ  $K$ , то в цепи колебания. Конденсатор начнет появляться нарастающий ток и поле. Нарастание магнитного поля контуре ЭДС самоиндукции

внимание на знак "минус") скорость замедляется. После того, как

конденсатор полностью разрядится, ЭДС начинает поддерживать ток в прежнем направлении.

В итоге происходит перезаряд конденсатора, т.е. первоначально положительно заряженная пластина конденсатора становится отрицательно заряженной и наоборот. Затем процесс разряда начнется снова, но в обратном направлении. Эти процессы периодические.

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

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

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

$$d\left(\frac{q^2}{2c} + \frac{LI^2}{2}\right) = -I^2 R dt, \quad (2)$$

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

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

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

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

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

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

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

здесь  $q_0 e^{-\beta t} = q(t)$  – амплитуда колебаний заряда конденсатора в момент времени  $t$ ,  $q_0$  – значение заряда при  $t=0$ ,  $\varphi_0$  – начальная фаза колебаний.

Циклическая частота затухающих колебаний  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ , отличающаяся от частоты собственных колебаний  $\omega_0$ , определяет условный период этих колебаний

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

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

Затухание колебаний характеризуется величиной, называемой логарифмическим декрементом затухания,

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

или с учетом выражений для  $\beta$  и  $T$

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

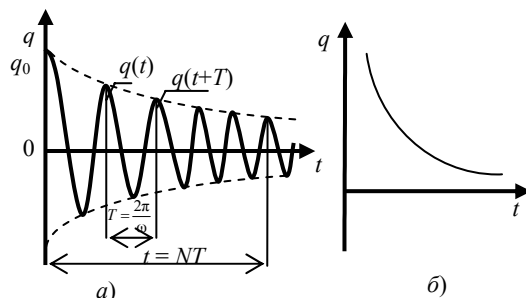
В технике качество колебательной системы характеризуется так называемой добротностью  $\theta$  контура. Добротностью называют физическую величину, равную произведению числа  $\pi$  на количество полных колебаний  $N$ , в течение которых амплитуда уменьшается в  $e$  раз. Из условия  $q_0 e^{-\beta t}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

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

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

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

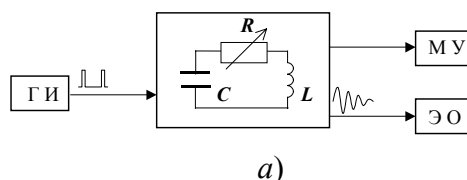
называется **критическим**.  
Характер обкладках индуктивности при апериодическом раз-



**ческим.**  
изменения заряда (напряжения) на конденсатора или тока в катушке затухающих колебаниях и ряде изображены на рис. 2, а, б.

### Описание установки

Исследование свободных затухающих колебаний проводится на установке, блок-схема которой показана на рис. 3, а, где ГИ – генератор кратковременных импульсов, RCL – колебательный контур, МУ – мостик Уитстона, ЭО – электронный осциллограф.



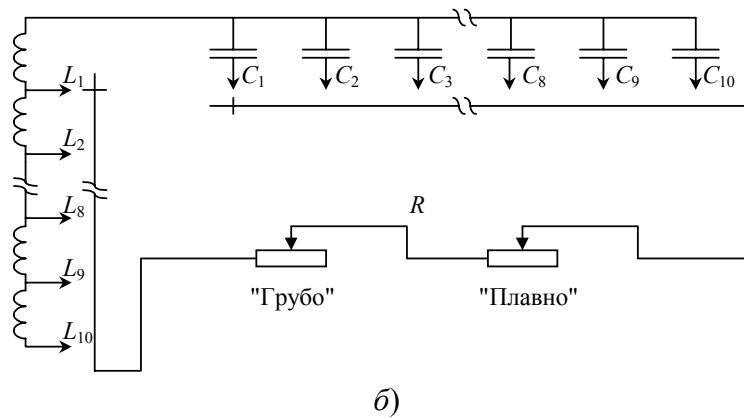
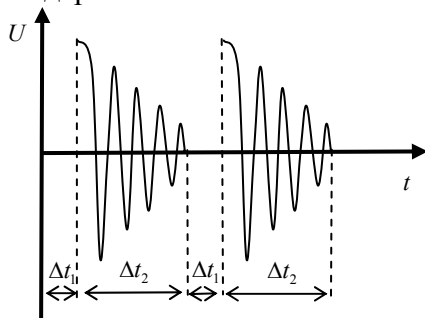


Рис. 3

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



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

Амплитуда напряжения на обкладках конденсатора меняется по закону

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

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

### Порядок выполнения работы

**ВНИМАНИЕ!** Перед выполнением работы необходимо ознакомиться с устройством колебательного контура установки (см. макет) и схемой подсоединения его элементов, а также с принципами работы электронного осциллографа и мостика Уитстона.

**Задание 1.** Исследование зависимости периода колебаний от параметров колебательного контура: емкости  $C$  и индуктивности  $L$ .

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

1 С помощью переключателей (см. макет установки) установите любое сочетание заданных преподавателем величин емкостей и индуктивностей ( $C_i, L_i$ ) (задаются по два значения). Внешнее сопротивление контура выведите на нуль ( $R = 0$ ) вращением против часовой стрелки до упора переключателей R "грубо" и "плавно". В контуре останется лишь активное сопротивление подключенной части катушек индуктивности.

2 Подключите осциллограф и блок питания генератора импульсов (ГИ) и мостика Уитстона (МУ) в сеть 220 В, включите осциллограф, замкните ключ  $K_1$  и дайте прогреться элементам установки в течение 2–3 мин. Ключ  $K_2$  должен находиться в положении "на себя" (исходное положение).

- 3 Получите устойчивую картину затухающих колебаний, проделав следующие операции:
- а) в блоке осциллографа "синхронизация" переключатель "внутр.–внеш." установите в положение "внутр.";
  - б) в блоке "развертка" переключатель "X" поставьте в положение "x1", переключатель " $S - \mu S$ " установите на  $0,1 mS$ , переключатель "время/см" поверните вправо до упора и нажмите переключатель "x1";
  - в) в блоке "усилитель" переключатель "V/см" поставьте в положение "1" и нажмите переключатель "x0,5.";
  - г) ручкой "уровень" в блоке синхронизации окончательно стабилизируйте кривую затухающих колебаний;
  - д) ручками, расположенными под экраном осциллографа, отрегулируйте яркость и резкость кривой и ее положение по вертикали и горизонтали относительно центра экрана.
- 4 Учитывая, что после калибровки осциллографа деление в 1 см по горизонтали соответствует 0,1 мсек.  $[(0,1 \times 1 \times 1) mS]$ , замерьте период ( $T_{\text{эксп}}$ ) одного полного колебания или время N полных колебаний и разделите это время на число колебаний. Для более точной оценки целесообразно воспользоваться мелкими делениями, расположенными в центре, сверху и снизу экрана. Цена этих делений 0,02 м.с. (в центре) и 0,01 м.с (внизу и вверху). Данные занесите в табл. 1, а полученную кривую перенесите на кальку.

Таблица 1

Параметры контура	$L_i, L_j,$ мГн	$C_i, C_j,$ нФ	$R_{L_i},$ $R_{L_j},$ Ом		$t \cdot 10^5,$ с	$T_{\text{эксп}} \cdot 10^5,$ с	$T_{\text{теор}} \cdot 10^5,$ с	$E_T,$ %
$L_i, C_i$								
$L_i, C_j$								
$L_j, C_i$								
$L_j, C_j$								

5 Мостиком Уитстона (см. в методическом пособии "Постоянный ток" лабораторную работу "Изучение законов постоянного тока", задание 2) замерьте величину активного сопротивления включенных катушек индуктивности. Для этого ключ  $K_2$  переведите в положение "Вкл. М.У." и одновременным нажатием кнопки и вращением реохорда мостика добейтесь установления стрелки на нуль. По схеме, приведенной на приборе, произведите отсчет сопротивления и запишите его в табл. 1. (Особенность установки: при переключении  $K_2$  колебательный контур отключается от осциллографа и кривая затухающих колебаний исчезает с экрана). После замера сопротивления ключ  $K_2$  верните в исходное положение.

6 Поочередно меняя  $L_i$  и  $C_i$  на заданные преподавателем значения  $L_j, C_j$ , замерьте для каждого из сочетаний период колебаний  $T_{\text{эксп}}$ . Мостиком Уитстона замерьте сопротивление катушки  $L_j$ . Данные занесите в табл. 1, а кривые переведите с экрана на кальку.

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

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

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

1 Установите первоначальные значения  $L_i$  и  $C_i$  и одну из заданных величин  $R_{ij}$  контура. Сопротивление набирается вращением по часовой стрелке переключателей  $R$  (в начале "грубо", а затем "плавно" с одновременным измерением мостиком Уитстона). При этом ключ  $K_2$  должен быть переведен в положение "Вкл. М.У.". После измерения  $R$  ключ  $K_2$  переведите в исходное положение.

2 Нажмите переключатель усилителя "X1". При этом деление в 1 см по вертикали экрана будет соответствовать амплитуде 0,8 В.

3 Замерьте в делениях или в вольтах по сантиметровым или более мелким делениям амплитуды двух соседних колебаний. Если затухание невелико, замеры произведите через  $N$  периодов колебаний. Все данные занесите в табл. 2, осциллограмму переведите на кальку.

**Таблица 2**

№ п/ п	$L_i, L_j,$ мГн	$C_i, C_j$ , нФ	$R_i,$ $R_j,$ Ом	$A_i^{\text{экс}}$	$A_{(t+NT)}^{\text{экс}}$	$\delta_{\text{экс}}$	$\delta_{\text{теор}}$	$\theta_{\text{экс}}$	$\theta_{\text{теор}}$	$E_{\delta},$ %	$E_{\theta},$ %
1											
2											
3											
4											

4 Измените величину индуктивности контура  $L_i$  на  $L_j$ , заданную преподавателем, оставляя неизменными емкость  $C_i$  и сопротивление  $R_i$ . Замерьте амплитуды соседних или через  $N$  периодов колебаний, зарисуйте картинку колебаний, а данные занесите в табл. 2.

5 Измените величину емкости  $C_i$  на  $C_j$ , оставляя первоначальными  $L_i$  и  $R_i$ . Замерьте амплитуды, переведите осциллограмму на кальку, данные запишите в табл. 2.

6 Поставьте исходное значение емкости  $C_i$ . С помощью переключателей  $R$  "грубо" и "плавно" установите величину  $R_j$ , заданное преподавателем, измерив его мостиком Уитстона (см. п. 1 задания 2). Произведите измерения амплитуд, зарисуйте осциллограмму и дополните данными табл. 2.

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

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

$$\delta_{\text{экс}} = \frac{1}{n} \ln \frac{A_m}{A_{m+N}}; \theta_{\text{экс}} = \frac{\pi}{\delta_{\text{экс}}}$$

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

10 Оцените погрешности  $\frac{|\delta_{\text{теор}} - \delta_{\text{экс}}|}{\delta_{\text{теор}}}$  и  $\frac{|\theta_{\text{теор}} - \theta_{\text{экс}}|}{\theta_{\text{теор}}}$ , с которыми в данной работе определяются логарифмические декременты затухания и добротности контуров и сделайте выводы о качестве согласования опытных и теоретических значений исследуемых величин.

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

1 Установите первоначальное значение индуктивности  $L_i$  и любую из заданных  $C_{i,j}$  величин  $C$ , за исключением  $C_1 - C_4$  (при этих емкостях на данной установке нельзя достигнуть аperiodического разряда). Постепенно увеличивая сопротивление  $R$ , используя переключатели "грубо" и "плавно" перевести колебательный процесс разряда конденсатора в аperiodический (см. рис. 2, б). Такой характер аperiodического разряда обусловлен наличием в схеме генератора импульсов электронного ключа, который практически мгновенно отключает контур после выдачи импульса, заряжающего конденсатор. Для большей точности определения момента перехода к аperiodическому разряду, заключительную стадию увеличения сопротивления производите с помощью рукоятки "плавно", а переключатель "V/см" в блоке усилителя осциллографа переведите в положение "0,1".

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

3 Устанавливая поочередно индуктивность  $L_j$  и емкость  $C_j$  и повторяя каждый раз операции п.п. 1 и 2, замерьте критические значения  $R_{\text{кр}2}^{\text{экс}}$  и  $R_{\text{кр}3}^{\text{экс}}$ . Данные занесите в табл. 3.

Параметры контура	$L_i, L_j,$ мГн	$C_i, C_j,$ нФ	$R_{кр}^{эксп},$ Ом	$R_{кр}^{теор},$ Ом	$E_{R_{кр}},$ %
$C_i L_i$					
$C_i L_j$					
$C_j L_i$					
$C_j L_j$					

4 По формуле (9) рассчитайте теоретические значения критических сопротивлений  $R_{кр}^{теор}$  для всех использованных величин  $C$  и  $L$  и внесите их в табл. 3. Сравните опытно полученные значения с теоретическими.

5 Рассчитайте погрешности  $E_R = \left| R_{кр}^{теор} - R_{кр}^{эксп} \right| / R_{кр}^{теор}$  в оценке критических сопротивлений, проанализируйте полученные результаты и сделайте выводы.

### Контрольные вопросы

1 Вывести дифференциальное уравнение, описывающее затухающие электромагнитные колебания в контуре.

2 Что такое период колебаний, логарифмический декремент затухания и добротность контура, и их физический смысл? Получить теоретическое соотношение для каждого из них.

3 Что такое апериодический разряд конденсатора, критическое сопротивление, его связь с параметрами контура?

4 Нарисуйте схему используемого в установке колебательного контура и объясните процесс образования электромагнитных колебаний в нем.

5 Как экспериментально определяются период колебаний, логарифмический декремент затухания, добротность контура и критическое сопротивление?

6 Объясните влияние емкости, индуктивности и активного сопротивления контура на характер затухающих колебаний в нем.

7 Приведите примеры использования колебательного контура.

Литература: [2, 5, 7, 10, 12].

### Лабораторная работа 4

#### ИЗМЕРЕНИЕ ИНДУКЦИИ И НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОСИ СОЛЕНОИДА

*Цель работы:* ознакомление с методами теоретического расчета магнитных полей, создаваемых проводниками с током, и экспериментальное измерение индукции и напряженности магнитного поля на примере соленоида.

*Приборы и принадлежности:* соленоид, измерительные и нормальная катушки, баллистический гальванометр, источник постоянного тока напряжением 12 В, коммутирующие ключи, соединительные провода.

#### Методические указания

**Соленоидом называется длинная цилиндрическая катушка, состоящая из большого числа витков проволоки. Если витки расположены вплотную или достаточно близко друг к другу, то соленоид можно рассматривать как систему последовательно соединенных круговых токов одинакового радиуса, имеющих общую ось.**

Вектор индукции магнитного поля, создаваемого отдельным витком, в любой точке, лежащей на оси соленоида, совпадает с ней. Его направление определяется правилом правого винта (буравчика), а численная величина равна

$$B = \frac{\mu\mu_0 IR^2}{2(R^2 + l^2)^{3/2}}, \quad (1)$$

где  $I$  – сила тока;  $R$  – радиус витка;  $l$  – расстояние вдоль оси от плоскости витка до рассматриваемой точки;  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость среды;  $\mu_0$  – магнитная постоянная.

Магнитное поле тока, текущего по всем виткам соленоида представляет собой суперпозицию полей



отдельных витков. Линии индукции (линии напряженности) магнитного поля внутри соленоида параллельны его оси, а их направление идентично направлению в постоянном полосовом магните – от южного к северному полюсу. Северный полюс соленоида будет с той стороны, из которой ток в витках виден идущим против часовой стрелки. Величина магнитного поля соленоида равна алгебраической сумме индукций магнитных полей, создаваемых всеми витками.

На рис. 1 представлено сечение соленоида с током. Кружки с точками означают, что ток в витке направлен к нам, с крестиками – от нас, за чертеж. Найдем индукцию  $B$  и напряженность  $H$  магнитного поля в некоторой точке  $A$  на оси соленоида. Обозначим:  $L$  – длина соленоида;  $N$  – полное число витков;  $n$  – плотность витков (количество витков, приходящихся на единицу длины соленоида);  $r_1$  и  $r_2$  – радиус-векторы, соединяющие точку  $A$  с крайними витками соленоида. Соответственно,  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – углы, под которыми видны эти витки из точки.

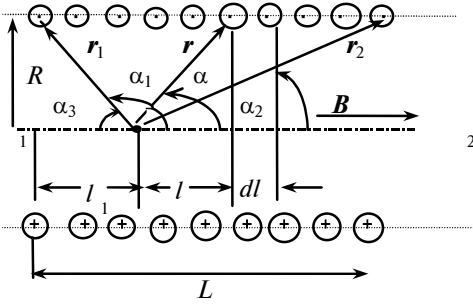


Рис. 1

На малом участке длины соленоида  $dl$  содержится  $ndl$  витков, создающих в точке  $A$ , согласно уравнению (1), магнитное поле с индукцией

$$dB = \frac{\mu\mu_0 IR^2}{2(R^2 + l^2)^{3/2}} ndl. \quad (2)$$

Переменные величины  $dl$  и  $r = \sqrt{R^2 + l^2}$  выразим через одну независимую – угол  $\alpha$ . Из рис. 1 видно, что  $l = R \operatorname{ctg} \alpha$ , откуда

$$dl = -R d\alpha / \sin^2 \alpha, \quad \text{а} \quad \sqrt{R^2 + l^2} = R / \sin \alpha,$$

Подставляя их в (2), получаем

$$dB = -\frac{\mu\mu_0}{2} nI \sin \alpha d\alpha. \quad (3)$$

После интегрирования в пределах от  $\alpha_1$  до  $\alpha_2$ , индукция в точке  $A$ , создаваемая всеми витками, равна

$$B = \frac{\mu\mu_0}{2} nI (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1). \quad (4)$$

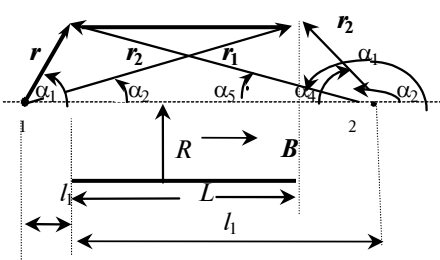
Учитывая, что угол  $\alpha_1$  – тупой, его можно записать через дополнительный угол  $\alpha_3$ :  $\alpha_1 = \pi - \alpha_3$ . Тогда уравнение (4) примет вид

$$B = \frac{\mu\mu_0}{2} nI (\cos \alpha_2 + \cos \alpha_3). \quad (5)$$

Напряженность  $H$  магнитного поля в точке  $A$  будет равна

$$H = \frac{B}{\mu\mu_0} = \frac{In}{2} (\cos \alpha_2 + \cos \alpha_3). \quad (6)$$

При этом



$$\cos \alpha_3 = l_1 / \sqrt{R^2 + l_1^2}, \quad \cos \alpha_2 = (L - l_1) / \sqrt{R^2 + (L - l_1)^2}.$$

Если точка  $A$  ( $A_1$ ), лежащая на оси соленоида  $O_1O_2$ , находится слева за пределами соленоида (рис. 2), то индукция  $B$  рассчитывается по формуле (4), а напряженность, соответственно, по формуле

$$H = \frac{B}{\mu\mu_0} = \frac{In}{2} (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1), \quad (7)$$

где  $\cos \alpha_1 = l_1 / \sqrt{R^2 + l_1^2}$ , а  $\cos \alpha_2 = (L + l_1) / \sqrt{R^2 + (L + l_1)^2}$ .

Если точка  $A$  ( $A_2$ ) находится справа от соленоида на его оси (рис. 2), то углы  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – тупые, и  $\cos \alpha_2$  и  $\cos \alpha_1$  выражаются через дополнительные углы  $\alpha_4$  и  $\alpha_5$ . Тогда

$$H = \frac{B}{\mu\mu_0} = \frac{In}{2} (\cos \alpha_5 - \cos \alpha_4), \quad (8)$$

где  $\cos \alpha_5 = l_1 / \sqrt{R^2 + l_1^2}$ ;  $\cos \alpha_4 = (l_1 - L) / \sqrt{R^2 + (l_1 - L)^2}$ .

Из рис. 1 и 2 и соотношений (4) – (8) следует, что индукция  $B$  и напряженность  $H$  будут наибольшими в точке, лежащей на середине оси соленоида,

$$B_{\max} = \mu\mu_0 In \frac{L}{\sqrt{4R^2 + L^2}}; \quad H_{\max} = In \frac{L}{\sqrt{4R^2 + L^2}}. \quad (9)$$

В точках, находящихся на одном из концов оси соленоида, либо  $\alpha_1 = \alpha_3 = \pi/2$  и  $\alpha_2 = 0$ , либо  $\alpha_1 = \alpha_3 = \pi$  и  $\alpha_2 = \pi/2$ , индукция и напряженность магнитного поля будут равны

$$B = \mu\mu_0 In/2 \quad \text{и} \quad H = In/2 \quad (10)$$

В случае бесконечно длинного соленоида ( $L \gg R$ ) для любых точек, расположенных на его оси,  $\alpha_1 = \pi$ ,  $\alpha_2 = 0$ , и

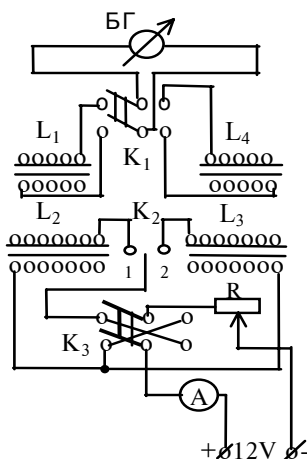
$$B = \mu\mu_0 In, H = In. \quad (11)$$

Более того, в бесконечно длинном соленоиде индукция и напряженность во всех точках его внутреннего объема такие же, как и на оси, т.е. поле такого соленоида однородно.

### Описание установки

Определение индукции и напряженности магнитного поля соленоида производится (рис. 3) состоит из баллистического соленоида  $L_2$  и намотанной на ней для определения баллистической катушки  $L_3$ , помещенной в реостата  $R$ , амперметра  $A$ , источника переключателей  $K_1, K_2$  и  $K_3$ .

Нормальная катушка  $L_2$  однослойный соленоид, на средней несколько слоев вторичная исследуемый соленоид  $L_4$  – также однослойная длинная катушка, внутри которой находится измерительная катушка  $L_3$ , длина которой гораздо меньше длины соленоида. Она намотана в несколько слоев и с помощью рукоятки винтовой передачи может перемещаться вдоль оси соленоида  $L_4$ .



напряженности магнитного поля баллистическим методом. Установка гальванометра БГ, нормальной катушки измерительной катушки  $L_1$ , служащих постоянной гальванометра, исследуемое поле соленоида  $L_4$ , постоянного тока  $\pm 12$  В и представляет собой длинный части которого плотно намотана в измерительная обмотка  $L_1$ .

представляет собой длинный части которого плотно намотана в измерительная обмотка  $L_1$ .

### Определение постоянной гальванометра

Индукция и напряженность магнитного поля соленоида в центре достаточно длиной катушки  $L_2$ , согласно (11) равны:  $B = \mu\mu_0 I_1 N_2 / l_2$  и  $H = I_1 N_2 / l_2$ , где  $I_1$  – ток в катушке,  $N_2$  и  $l_2$  – число витков и ее длина, соответственно;  $\mu = 1$  – магнитная проницаемость воздуха.

Потокосцепление в измерительной катушке  $L_1$  будет равно

$$\Psi = \Phi N_1 = B S N_1 = \mu_0 I_1 N_1 N_2 S_1 / l_2,$$

где  $N_1$  – число витков измерительной катушки, а  $S_1$  – площадь ее поперечного сечения.

При быстром изменении направления тока в катушке  $L_2$  (с помощью коммутирующего ключа  $K_3$ ) потокосцепление в измерительной катушке  $L_1$  изменится на величину  $\Delta\Psi = \Psi - (-\Psi) = 2\Psi$ . При этом в измерительной катушке индуцируется ЭДС индукции, равная  $\varepsilon = -\Delta\Psi/\Delta t$ , и по цепи баллистического гальванометра пройдет кратковременный импульс индукционного тока. В результате рамка гальванометра и укрепленное на ней зеркальце повернутся на некоторый угол, который фиксируется отбросом светового "зайчика"  $n_0$  (в мм или делениях) по шкале гальванометра.

Количество заряда, прошедшего при этом через гальванометр, пропорционально первоначальному отбросу:  $q = C_6 n_0$ , где  $C_6$  – баллистическая постоянная гальванометра. С другой стороны, этот же заряд (что несложно показать) равен  $q = 2\Psi/r$ , где  $r$  – сопротивление цепи баллистического гальванометра. Сравнивая эти два выражения, получаем  $C_6 = 2\Psi/n_0 r$ . Так как в измерительной схеме омические сопротивления обмоток катушек  $L_1$  и  $L_2$  мало отличаются друг от друга, а их величина порядка 2...3 Ом, что много меньше, чем собственное сопротивление гальванометра ( $> 600$  Ом), можно считать, что полное сопротивление цепи гальванометра практически остается неизменным при всех измерениях. Это позволяет баллистическую постоянную  $C_6$  заменить новой:  $C = C_6 r$ . Тогда окончательно получаем расчетную формулу

$$C = \frac{2\mu_0 I_1 N_1 N_2 S_1}{l_2 n_0}, \quad (12)$$

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

### Определение индукции и напряженности магнитного поля вдоль оси соленоида

Если с помощью ключей  $K_1$  и  $K_2$  установку переключить для работы с соленоидом  $L_4$ , магнитное поле которого исследуется, и его измерительной катушкой  $L_3$ , то, при коммутировании тока в соленоиде



$B_{x(\text{эксп})}$												
$H_{x(\text{теор})}$												
$B_{x(\text{теор})}$												

11 Найдите  $n_{0 \text{ ср}}$  (по п. 4. и табл. 1.) и по формуле (12) рассчитайте замененное значение баллистической постоянной гальванометра  $C$ .

12 По формулам (13) вычислите все значения  $H_{x(\text{эксп})}$  и  $B_{x(\text{эксп})}$  и постройте графики распределения напряженности и индукции магнитного поля вдоль оси соленоида  $H = f(l_1)$ ,  $B = f(l_1)$ .

13 По формулам (5) – (8) рассчитайте теоретические значения  $H_{x(\text{теор})}$  и  $B_{x(\text{теор})}$  для всех точек, в которых проводились измерения, и сравните с экспериментально найденными. Кроме того, отдельно вычислите теоретические значения напряженности и индукции магнитного поля в точках, соответствующих середине и краям соленоида по формулам (9), (10), и сопоставьте их с полученными экспериментально. Оцените расхождение значений  $H$  и  $B$  полученных для средней точки исследуемого соленоида с индукцией и напряженностью магнитного поля для бесконечно длинного соленоида, рассчитанных по формулам (11).

**14 Сделайте выводы о характере распределения магнитного поля вдоль оси исследуемого соленоида.**

### *Контрольные вопросы*

- 1 Физический смысл понятий индукции и напряженности магнитного поля.
- 2 Запишите закон Био-Савара-Лапласа и покажите его применение к расчету поля прямого тока и поля на оси кругового витка с током.
- 3 Выведите расчетные формулы для поля соленоида конечной длины.
- 4 Поясните физический смысл теоремы о циркуляции вектора индукции магнитного поля и ее применение для расчета поля бесконечно длинного соленоида.
- 5 Объясните принцип работы, схему установки и методику измерений.
- 6 Как будет изменяться распределение поля вдоль оси соленоида в зависимости от соотношения между его длиной и диаметром?

Литература: [1, 5, 8, 12].

### **СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

- 1 Ахматов А.С. и др. Лабораторный практикум по физике. М., 1980.
- 2 Белянкин А.Г. и др. Физический практикум. Электромагнетизм. Оптика / Под ред. В.И. Ивероной. М., 1968. Задания № 102, 103.
- 3 Буравихин В.А. и др. Практикум по магнетизму. М., 1979.
- 4 Детлаф А.А., Яворский Б. М. и др. Курс физики. М., 1989.
- 5 Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М., 1987.
- 6 Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М., 1977, Т. 2.
- 7 Зисман Г.А., Тодес О.И. Курс общей физики. М., 1969. Т. 2. § 51, 52.
- 8 Иродов И.Е. Основные законы электромагнетизма. М., 1983.
- 9 Калашников С.Г. Электричество. М., 1977.
- 10 Калашников С.Г. Электричество. М., 1974. § 207 – 211.
- 11 Майсова Н.Н. Практикум по курсу общей физики. М., 1970.
- 12 Савельев И.В. Курс общей физики. М., 1982. Т. 2.