



ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

◆ ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ ◆

Министерство образования Российской Федерации
ТАМБОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

Лабораторные работы

Тамбов
Издательство ТГТУ
2002

УДК 535.338 (076.5)
ББК В36я73-5
Э45

Рецензент
Доктор педагогических наук, профессор

Н. Я. Молотков

Составители:

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

Э45 Электromагнетизм: Лаб. раб. / А. М. Савельев, Ю. П. Ляшенко, В. А. Шишин, В. И. Барсуков. Тамбов. Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2002. 28 с.

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

Лабораторные работы предназначены для студентов 1 – 2-го курсов всех специальностей и форм обучения инженерного профиля.

УДК 535.338 (076.5)
ББК В36я73-5

© Тамбовский государственный
технический университет
(ТГТУ), 2002

Учебное издание

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

Лабораторные работы

Составители: Савельев Александр Михайлович,
Ляшенко Юрий Петрович,
Шишин Валерий Анатольевич,
Барсуков Владимир Иванович

Редактор и технический редактор М. А. Евсейчева
Компьютерное макетирование М. А. Филатовой

Подписано к печати 16.09.02.
Формат 60×84/16. Гарнитура Times NR. Бумага газетная. Печать офсетная.
Объем: 1,63 усл. печ. л.; 2,00 уч.-изд. л.
Тираж 100 экз. С 565^М

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

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?

Список рекомендуемой литературы

- 1 Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 2. М., 1982.
- 2 Детлаф А. А., Яворский Б. М. Курс физики. М., 1987.
- 3 Ахматов А. С. и др. Лабораторный практикум по физике. М., 1980.
- 4 Иродов И. Е. Основные законы электромагнетизма. М.: Высшая школа, 1983.

Лабораторная работа

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

Основные закономерности, поясняющие данный метод, можно выявить, рассмотрев для простоты движение электрона, вылетающего 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:

$$evB = \frac{mv^2}{r}, \quad (1)$$

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

Или

$$r = \frac{mv}{eB}. \quad (2)$$

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 полному 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 .

Следует отметить, что в этом случае траектории движения электронов в магнитном поле уже не являются окружностями, а линиями с переменным радиусом кривизны. Это объясняется тем, что скорость

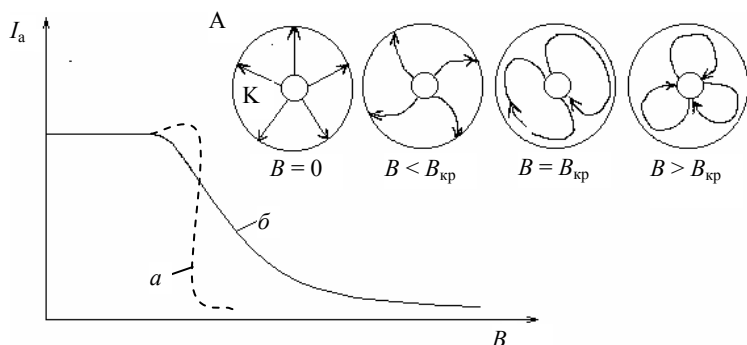


Рис. 1. Идеальная (*a*) и реальная (*б*) сбросовые характеристики

электрона непрерывно меняется за счет ускорения, передаваемого ему силами электрического поля. Поэтому 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 $I_a = f(I_c)$ строят зависимость

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

при тех же значениях тока соленоида. ΔI_a – приращение анодного тока при соответствующем изменении тока соленоида ΔI_c .

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

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

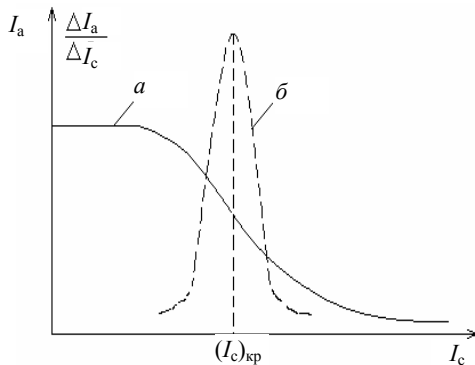


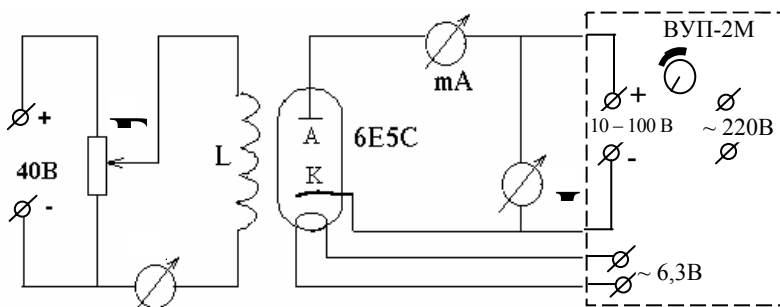
Рис. 2. Сбросовая (а) и дифференциальная (б) характеристики лампы

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

УСТАНОВКА СОБРАНА НА ЛАМПЕ 6Е5С, КОТОРАЯ ОБЫЧНО ИСПОЛЬЗУЕТСЯ В КАЧЕСТВЕ ЭЛЕКТРОННОГО ИНДИКАТОРА. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА УСТАНОВКИ ПРЕДСТАВЛЕНА НА РИС. 3.

ПИТАНИЕ ЛАМПЫ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ ОТ ВЫПРЯМИТЕЛЯ ВУП-2М, В КОТОРОМ С ПОМОЩЬЮ КРУГОВОГО ПОТЕНЦИОМЕТРА (НА ЛИЦЕВОЙ СТОРОНЕ РУЧКА 0 ... 100 В) РЕГУЛИРУЕТСЯ ВЕЛИЧИНА НАПРЯЖЕНИЯ МЕЖДУ АНОДОМ И КАТОДОМ. КАТОД ЛАМПЫ НАГРЕВАЕТСЯ ПЕРЕМЕННЫМ ТОКОМ С НАПРЯЖЕНИЕМ $\sim 6,3$ В, СНИМАЕМЫМ С СООТВЕТСТВУЮЩИХ КЛЕММ ВЫПРЯМИТЕЛЯ. ВЫПРЯМИТЕЛЬ ПОДСОЕДИНЯЕТСЯ К СЕТЕВОЙ РОЗЕТКЕ 220 В, УКРЕПЛЕННОЙ НА ЛАБОРАТОРНОМ СТОЛЕ.

РИС. 3. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА УСТАНОВКИ:



ВУП-2М – ВЫПРЯМИТЕЛЬ; R – ПОТЕНЦИОМЕТР 0 ... 30 Ом;
А – АМПЕРМЕТР 0 ... 2А; МА – МИЛЛИАМПЕРМЕТР – 0 ... 2 МА;
V – ВОЛЬТМЕТР 0 ... 100 В

Соленоид L через потенциометр R запитывается от источника постоянного тока, выведенного на розетку ± 40 В, укрепленную также на лабораторном столе. Ток соленоида замеряется амперметром с пределами $0 \dots 2$ А, анодный ток фиксируется миллиамперметром с пределами $0 \dots 2$ мА, а анодное напряжение – вольтметром с пределами измерения $0 \dots 150$ 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 выход накала лампы к клеммам выпрямителя $\sim 6,3$ В.

3 Ручкой потенциометра ($0 \dots 100$ В) выпрямителя по вольтметру установите одно из трех заданных преподавателем значений анодного напряжения (U_{a_1}).

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

Таблицы 1 – 3

№ п/п	Ток соленоида, I_c (А)	Ток анода I_a (мА)	Приращение тока соленоида, ΔI_c (А)	Приращение анодного тока, ΔI_a (мА)	$\frac{\Delta I_a}{\Delta I_c}$	$(I_c)_{\text{кр}}$ (А)	$B_{\text{кр}}$ (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								

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. $\frac{\Delta I_a}{\Delta I_c} = f(I_c)$ и по ним определите критические величины тока соленоида $(I_c)_{\text{кр}}$, как схематично показано на рис. 2.

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

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

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

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

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 ΔN можно пренебречь. Погрешности $(\Delta I_c)_{\text{кр}}$ и ΔU_a определите по классу точности амперметра и вольтметра.

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

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 $I_c < I_{\text{кр}}$, $I_c = I_{\text{кр}}$, $I_c > I_{\text{кр}}$.

- 5 Выведите формулу (6) и (8).
- 6 Объясните принципиальное различие идеальной и реальной сбросовых характеристик электронной лампы.

Список рекомендуемой литературы

- 1 Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 2. М.: Наука, 1982.
- 2 Детлаф А. А., Яворский Б. М. и др. Курс физики. М.: Высшая школа, 1989.
- 3 Буравихин В. А. и др. Практикум по магнетизму. М.: Высшая школа, 1979.
- 4 Майсова Н. Н. Практикум по курсу общей физики. М.: Высшая школа, 1970.

Лабораторная работа

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 затем замкнуть ключ K , то в цепи возникнут электромагнитные колебания. Конденсатор начнет разряжаться и в контуре появляется нарастающий ток и пропорциональное ему магнитное поле. Нарастание магнитного поля приводит к возникновению в контуре ЭДС самоиндукции:

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?

Список рекомендуемой литературы

- 1 Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 2. М., 1982.
- 2 Детлаф А. А., Яворский Б. М. Курс физики. М., 1987.
- 3 Ахматов А. С. и др. Лабораторный практикум по физике. М., 1980.
- 4 Иродов И. Е. Основные законы электромагнетизма. М.: Высшая школа, 1983.

Лабораторная работа

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

Основные закономерности, поясняющие данный метод, можно выявить, рассмотрев для простоты движение электрона, вылетающего 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 $F_L = evB$, которая перпендикулярна скорости электрона и, следовательно, является центростремительной силой. При этом движение электрона под действием такой силы совершается по окружности, радиус которой определяется условием:

$$evB = \frac{mv^2}{r}, \quad (1)$$

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

Или

$$r = \frac{mv}{eB}. \quad (2)$$

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 полному прекращению при значениях $B > B_{кр}$.

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

Следует отметить, что в этом случае траектории движения электронов в магнитном поле уже не являются окружностями, а линиями с переменным радиусом кривизны. Это объясняется тем, что скорость

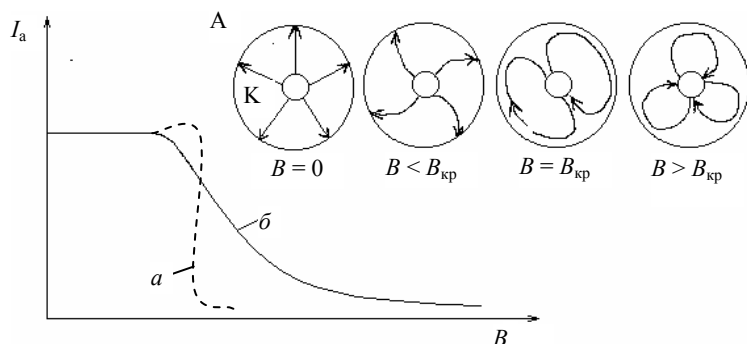


Рис. 1. Идеальная (а) и реальная (б) сбросовые характеристики

электрона непрерывно меняется за счет ускорения, передаваемого ему силами электрического поля. Поэтому 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 $I_a = f(I_c)$ строят зависимость

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

при тех же значениях тока соленоида. ΔI_a – приращение анодного тока при соответствующем изменении тока соленоида ΔI_c .

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

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

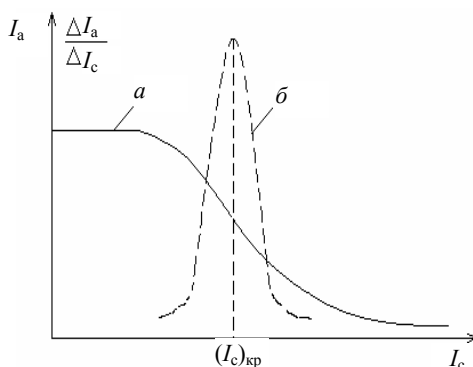


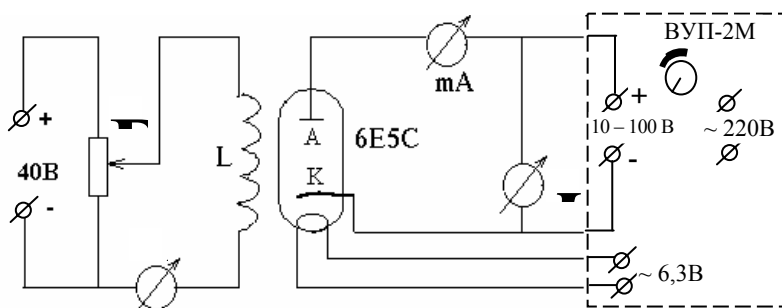
Рис. 2. Сбросовая (а) и дифференциальная (б) характеристики лампы

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

УСТАНОВКА СОБРАНА НА ЛАМПЕ 6Е5С, КОТОРАЯ ОБЫЧНО ИСПОЛЬЗУЕТСЯ В КАЧЕСТВЕ ЭЛЕКТРОННОГО ИНДИКАТОРА. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА УСТАНОВКИ ПРЕДСТАВЛЕНА НА РИС. 3.

ПИТАНИЕ ЛАМПЫ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ ОТ ВЫПРЯМИТЕЛЯ ВУП-2М, В КОТОРОМ С ПОМОЩЬЮ КРУГОВОГО ПОТЕНЦИОМЕТРА (НА ЛИЦЕВОЙ СТОРОНЕ РУЧКА 0 ... 100 В) РЕГУЛИРУЕТСЯ ВЕЛИЧИНА НАПРЯЖЕНИЯ МЕЖДУ АНОДОМ И КАТОДОМ. КАТОД ЛАМПЫ НАГРЕВАЕТСЯ ПЕРЕМЕННЫМ ТОКОМ С НАПРЯЖЕНИЕМ ~ 6,3 В, СНИМАЕМЫМ С СООТВЕТСТВУЮЩИХ КЛЕММ ВЫПРЯМИТЕЛЯ. ВЫПРЯМИТЕЛЬ ПОДСОЕДИНЯЕТСЯ К СЕТЕВОЙ РОЗЕТКЕ 220 В, УКРЕПЛЕННОЙ НА ЛАБОРАТОРНОМ СТОЛЕ.

РИС. 3. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА УСТАНОВКИ:



ВУП-2М – ВЫПРЯМИТЕЛЬ; R – ПОТЕНЦИОМЕТР 0 ... 30 ОМ;
А – АМПЕРМЕТР 0 ... 2А; МА – МИЛЛИАМПЕРМЕТР – 0 ... 2 МА;
V – ВОЛЬТМЕТР 0 ... 100 В

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

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

12 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.

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

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

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

Таблицы 1 – 3

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

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

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

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

19 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.

20 Рассчитайте относительную погрешность в определении искомой величины (e/m) по формуле:

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

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

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

22 Проанализируйте полученные результаты и сделайте выводы.

Контрольные вопросы

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

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

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

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

11 Выведите формулу (6) и (8).

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

Список рекомендуемой литературы

5 Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 2. М.: Наука, 1982.

6 Детлаф А. А., Яворский Б. М. и др. Курс физики. М.: Высшая школа, 1989.

7 Буравихин В. А. и др. Практикум по магнетизму. М.: Высшая школа, 1979.

8 Майсова Н. Н. Практикум по курсу общей физики. М.: Высшая школа, 1970.

Лабораторная работа

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).

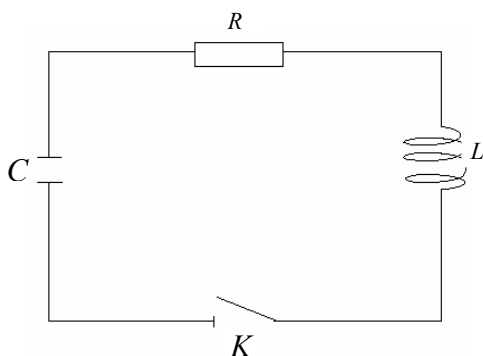
Если конденсатор зарядить, а затем замкнуть ключ K , то в цепи возникнут электромагнитные колебания. Конденсатор начнет разряжаться и в контуре появляется нарастающий ток и пропорциональное ему магнитное поле. Нарастание магнитного поля приводит к возникновению в контуре ЭДС самоиндукции:

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

В результате этого разряда конденсатора полностью разрядится, направлении. В итоге начально положительно отрицательно заряженной и в обратном направлении.

Колебания в механическими

Во время энергии из одной формы в



. 1.

(обратите внимание на знак "минус") скорость замедляется. После того, как конденсатор ЭДС начинает поддерживать ток в прежнем происходит перезаряд конденсатора, т.е. перво-заряженная пластина конденсатора становится наоборот. Затем процесс разряда начнется снова, но Эти процессы периодические.

электрическом контуре сопоставимы с колебаниями, например, груза на пружине.

колебательного процесса происходит переход 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 колеблющейся груз, и других явлений. Амплитуда электромагнитных колебаний также уменьшается вследствие потерь энергии из-за нагрева активного сопротивления, которое всегда присутствует (катушка имеет омическое сопротивление) и излучения электромагнитных волн, так как контур не является идеально закрытым. При небольших частотах колебаний последним фактором можно пренебречь. В результате электромагнитные колебания, так же как и механические будут затухающими.

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

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

где $\frac{q^2}{2C}$ – энергия электрического поля в конденсаторе; $\frac{LI^2}{2}$ – 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

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

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

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

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

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

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

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

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

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 β и T

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

В технике качество колебательной системы характеризуется так называемой добротностью θ контура. Добротностью называют физическую величину равную произведению числа π на количество полных колебаний N , в течение которых амплитуда уменьшается в e раз. Из условия $\frac{q_0 e^{-\beta t}}{q_0 e^{-\beta(t+NT)}} = e$ находим $N = \frac{1}{\beta T}$. 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 $T = \frac{2\pi}{\sqrt{1/LC - R^2/4L^2}}$ теряет смысл и периодический процесс в контуре переходит в аperiodический, при этом сопротивление контура

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

называется **критическим**. Характер изменения заряда (напряжения) на обкладках конденсатора или тока в катушке индуктивности при затухающих колебаниях и аperiodическом разряде изображены на рис. 2 а, б.

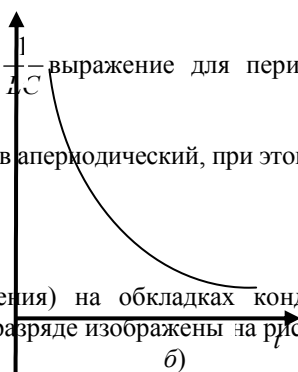
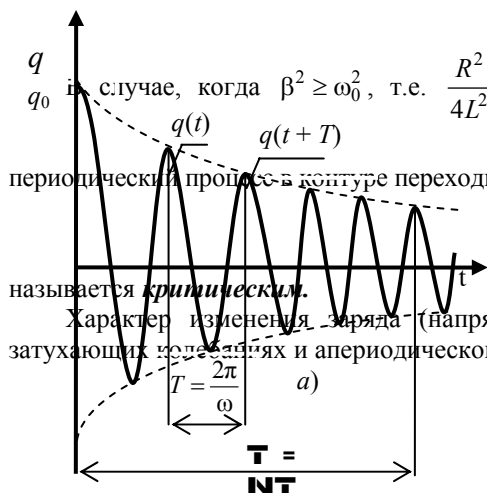


РИС. 2. ХАРАКТЕР ИЗМЕНЕНИЯ ЗАРЯДА

Описание установки

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

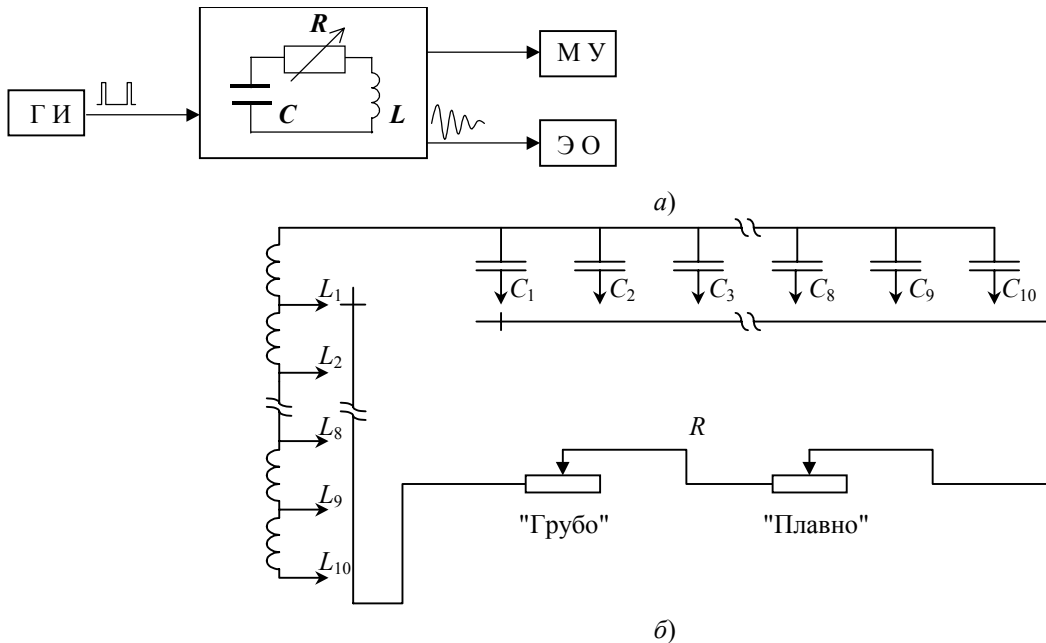


Рис. 3. Исследование свободных затухающих колебаний

Развернутая схема Варьирование параметрами сопротивлением) на установке посредством переключателя конденсаторов $C_1 - C_{10}$; путем последовательного соединенных между собой, индуктивность $L_1 = L$, а $L_4 = L$ подбирается с помощью подключения последовательно последовательно

("плавно"). Значения емкостей Величина полного омического сопротивления контура, включая сопротивление обмоток соответствующих катушек индуктивностей, измеряется встроенным в установку стандартным мостиком Уитстона (МУ).

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

Амплитуда напряжения на обкладках конденсатора меняется по закону

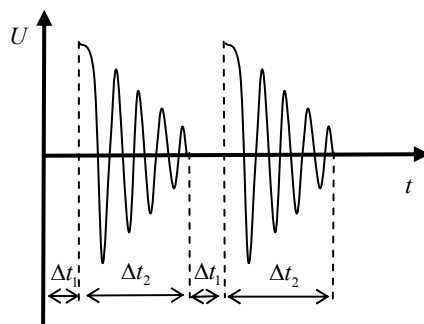
$$U = U_0 e^{-\beta t},$$

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 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



колебательного контура дана на рис. 3, б. контура (емкостью, индуктивностью и омическим осуществляется следующим образом: емкостью – "C" в контур вводится один из набора индуктивность изменяется переключателем "L" подключения к катушке L_1 аналогичных, катушек в блоке $L_2 - L_{10}$. Например: $+ L + L + L = 4L$, $L_6 = 6L$. Активное сопротивление переключателей "R" посредством ступенчатого соединенных резисторов ("грубо") и соединенного с ними переменного резистора и индуктивностей указаны на установке.

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

1 С помощью переключателей установите любое сочетание заданных преподавателем величин емкостей и индуктивностей (C_i, L_i) (задаются по 2 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 катушки 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 течении 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 – μS " установите на 0,1 мS, 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 Учтявая, что после калибровки осциллографа деление в 1 см по горизонтали соответствует 0,1 мс [(0,1x1x1) мS], замерьте период ($T_{\text{экс}}$) 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 мс (в центре) и 0,01 мс (внизу и вверху). Данные занесите в табл. 1, а полученную кривую перенесите на кальку.

5 Мостиком Уитстона (см. лаб. работу "Изучение законов постоянного тока", задание 2) замерьте величину активного сопротивления включенных катушек индуктивности. Для этого ключ K_2 переведите в

Таблица 1

Параметры контура	L_i, L_j , мГн	C_i, C_j , нФ	R_{L_i}, R_{L_j} , Ом	N	$t \cdot 10^5$, с	$T_{\text{экс}} \cdot 10^5$, 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								

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 ($T_{\text{экс}}$). 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 измеренными ($T_{\text{экс}}$). Сделайте выводы о влиянии каждого из параметров на период затухающих колебаний.

8 Определите погрешности в оценке периодов

$$E_T = \frac{|T_{\text{теор}} - T_{\text{экс}}|}{T_{\text{теор}}}$$

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	$A_i^{\text{экс}}$	$A_{(i+NT)}^{\text{экс}}$	$\delta_{\text{экс}}$	$\delta_{\text{теор}}$	$\theta_{\text{экс}}$	$\theta_{\text{теор}}$	$E_{\delta},$ %	$E_{\theta},$ %
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 (п. 1). 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_{ij} величин C , за исключением $C_1 - C_4$ (при этих емкостях на данной установке нельзя достигнуть аperiodического разряда). Постепенно увеличивая сопротивление R , сначала переключателем "грубо", а затем "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.

Таблица 3

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

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 $E_R = \frac{|R_{кр\ теор} - R_{кр\ экп}|}{R_{кр\ теор}}$ 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 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.

Список рекомендуемой литературы

- 1 Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 2. М., 1982. § 88 – 92.
- 2 Яворский Б. М, Детлаф А. А. Курс физики. М., 1987.
- 3 Калашников С. Г. Электричество. М., 1974. § 207 – 211.
- 4 Зисман Г. А., Годес О. И. Курс общей физики. Т. 2. М., 1969. § 51, 52.
- 5 Ахматов А. С. и др. Лабораторный практикум по физике. М., 1980. Работа № 47.
- 6 Белянкин А. Г. и др. Физический практикум. Электромагнетизм. Оптика / Под ред. В. И. Ивероной. М., 1968. Задания № 102, 103.