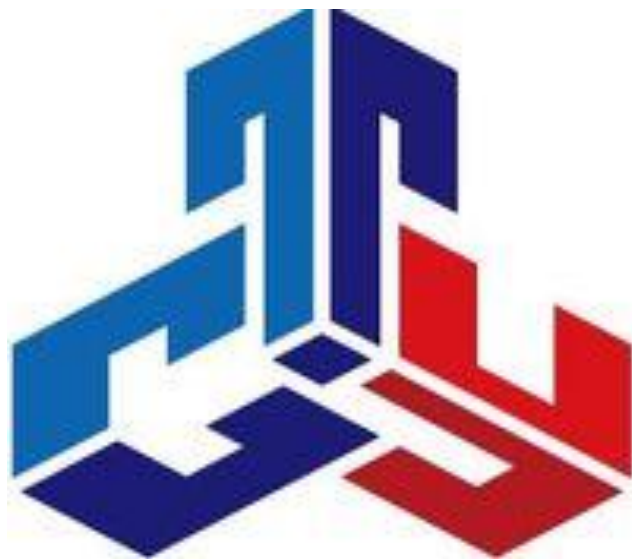


СОВРЕМЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



ФИЗИКА

Электричество и магнетизм

**Методическое указания
для выполнения лабораторных работ**

Рязань 2018

СОВРЕМЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ФИЗИКА

Электричество и магнетизм

**Методическое указания
для выполнения лабораторных работ**

Рязань 2018

УДК 53
ББК 22.3
Ф 50

Физика. Электричество и магнетизм: методические указания для выполнения лабораторных работ / Сост. Коненков Н.В., Ширяев А.Г.
Современный технический университет. - Рязань, 2018 - 36 с.-50экз

Рецензент: д.т.н. профессор РВВДКУ Гармаш Ю.В.

Методические указания предназначены для студентов-бакалавров очного и заочного отделений Современного технического университета.

В пособии содержатся описания восьми лабораторных работ, выполняемых студентами по разделу «Электричество и магнетизм» курса общей физики.

*Печатается по решению Ученого Совета
Современного технического университета*

УДК 53
ББК 22.3
Ф 50

© Н.В. Коненков, А.Г. Ширяев
© Современный технический университет, 2018

Лабораторная работа № 3 – 1

ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МОСТОВЫМ МЕТОДОМ

Цель работы. Научиться пользоваться мостовой резистивной схемой постоянного тока для измерения электрического сопротивления.

Элементы теории

Для измерения электрического сопротивления часто используют резистивную мостовую схему (мост Уитстона), работающую на постоянном токе. Схема моста Уитстона показана на рис. 1. Основой моста являются четыре сопротивления R_1 , R_X , R_3 , R_4 , поэтому такой мост называют резистивным. Символом R_X обозначим резистор, сопротивление которого следует определить. Через указанные резисторы протекают токи I_1 , I_2 , I_3 , I_4 . Между точками схемы C и D включен гальванометр G. К точкам A и B подключен источник постоянного напряжения U.

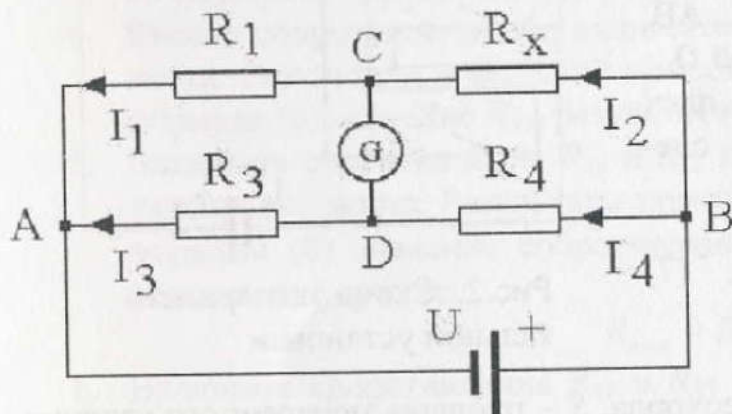


Рис. 1. Схема моста Уитстона.

Сопротивление R_X следует определять при условии баланса моста. Сбалансировать мост можно, подбирая сопротивления резисторов R_1 , R_3 , R_4 таким образом, чтобы ток через

гальванометр стал равен нулю. Условие отсутствия тока в гальванометре можно записать следующим образом:

$$\varphi_C = \varphi_D, \quad (1)$$

где φ_C и φ_D - потенциалы точек схемы C и D, соответственно.

Выполнение условия (1) соответствует следующим соотношениям между токами:

$$I_1 = I_2; \quad I_3 = I_4. \quad (2)$$

На основании закона Ома для отдельных участков цепи на рис. 1 запишем:

$$\begin{aligned} \varphi_A - \varphi_C &= I_1 R_1; & \varphi_A - \varphi_D &= I_3 R_3; \\ \varphi_C - \varphi_B &= I_2 R_X; & \varphi_D - \varphi_B &= I_4 R_4. \end{aligned} \quad (3)$$

Из этих соотношений следует, что

$$I_1 R_1 = I_3 R_3; \quad I_2 R_X = I_4 R_4. \quad (4)$$

Разделив равенства (4) друг на друга с учетом соотношения (2), получим:

$$\frac{R_1}{R_X} = \frac{R_3}{R_4}. \quad (5)$$

Таким образом, по известным значениям R_1 , R_3 , R_4 при условии отсутствия тока, протекающего через гальванометр, можно рассчитать значение неизвестного сопротивления R_X :

$$R_X = \frac{R_1 R_4}{R_3} \quad (6)$$

Схема установки, используемой в данной работе для измерения сопротивления на основе мостового метода, показана на рис. 2. В ней сопротивление R_1 выполнено в виде магазина сопротивлений. Это дает возможность изменять сопротивление R_1 с малым шагом в широких пределах.

Сопротивления R_3 и R_4 выполнены в виде реохорда, состоящего из шкалы, на которую натянута проволока из нихрома, длиной 50 см. Вдоль проволоки скользит движок с контактом D, который отделяет R_3 от R_4 . На рис. 2 реохорд обозначен буквами AB, движок реохорда обозначен буквой D.

Величины сопротивлений плеч реохорда можно представить в следующем виде:

$$R_3 = \rho \frac{l_1}{S} \quad R_4 = \rho \frac{l_2}{S} \quad , \quad (7)$$

где $l = l_1 + l_2$ - длина проволоки реохорда, S - площадь поперечного сечения проволоки.

Учитывая (5) и (6), величину неизвестного сопротивления R_X можно определить следующим образом:

$$R_X = R_1 \frac{l_2}{l_1} \quad (8)$$

Таким образом, чтобы определить неизвестное сопротивление R_X следует, изменяя сопротивление R_1 (магазин сопротивлений) и перемещая движок реохорда (расстояния l_1 и l_2), добиваться отсутствия тока в гальванометре G. Полученные при этом значения R_1 , l_1 и l_2 следует подставить в формулу (8) для определения R_X .

Ключи K_1 и K_2 служат для замыкания и размыкания цепи источника напряжения и цепи гальванометра. При работе с установкой сначала нужно замыкать ключ K_1 , затем, удерживая его замкнутым, замкнуть K_2 . Размыкать ключи следует в обратном порядке. Такая последовательность работы ключей связана с тем, что в моменты замыкания и размыкания цепи источника в схеме возникают ЭДС самоиндукции. Возникающие при этом токи самоин-

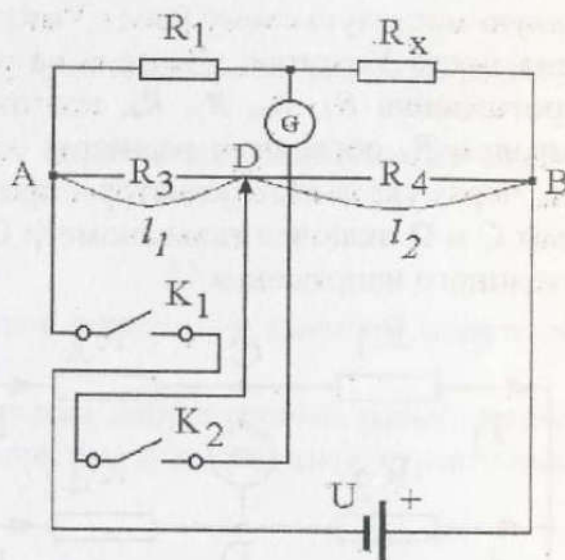


Рис.2. Схема экспериментальной установки

дукции могут вывести из строя гальванометр. Поэтому сначала следует замыкать цепь источника напряжения, затем – цепь гальванометра.

Порядок выполнения

1. Соберите схему установки (рис. 2). Установите в нее в качестве измеряемого сопротивления R_{X1} .
2. Осуществите балансировку моста. Для этого выполните следующие действия. Установите на магазине сопротивлений некоторое значение сопротивления R , двигая ползунок реохорда найдите такое его положение, при котором замыкание и размыкание ключей K_1 и K_2 не приводит к отклонению стрелки гальванометра от нулевого положения. Помните, что сначала нужно замкнуть ключ K_1 , затем удерживая его замкнуть ключ K_2 . Если балансировка моста не получается, установите другое значение R на магазине сопротивлений и повторите вышеописанные действия.
3. После того как мост сбалансирован, запишите в таблицу 1 значение R (с магазина сопротивлений), длины плеч реохорда l_1 и l_2 . Рассчитайте по формуле (8) значение R_{X1} , результат поместите в таблицу 1.
4. Вместо сопротивления R_{X1} включите R_{X2} и произведите балансировку моста. Результаты измерений поместите в таблицу 2. Рассчитайте по формуле (8) значение R_{X2} , результат поместите в таблицу 2.
5. Включите сопротивления R_{X1} и R_{X2} последовательно, произведите балансировку моста. Результаты поместите в таблицу 3. Рассчитайте по формуле (8) значение сопротивления, сравните его с результатами расчета по формуле:

$$R_{\text{посл}} = R_{X1} + R_{X2}.$$

6. Включите сопротивления R_{X1} и R_{X2} параллельно, произведите балансировку моста. Результаты поместите в таблицу 4. Рассчитайте по формуле (8) значение сопротивления, сравните его с результатами расчета по формуле:

$$\frac{1}{R_{\text{пар}}} = \frac{1}{R_{X1}} + \frac{1}{R_{X2}}$$

7. Рассчитайте погрешности измерений.

Таблица 1.

№ п.п.	R , Ом	l_1 , м	l_2 , м	R_{X1} , Ом
1				
2				
3				
4				

Таблица 2.

№ п.п.	R , Ом	l_1 , м	l_2 , м	R_{X2} , Ом
1				
2				
3				
4				

Таблица 3.

№ п.п.	R , Ом	l_1 , м	l_2 , м	$R_{ПОСЛ}$, Ом
1				
2				
3				
4				

Таблица 4.

№ п.п.	R , Ом	l_1 , м	l_2 , м	$R_{ПАР}$, Ом
1				
2				
3				
4				

Контрольные вопросы

1. Выведите условие равновесия моста.
2. При каком положении движка реохорда измерения проводятся с наибольшей точностью?
3. Изменится ли условие равновесия моста, если источник напряжения и гальванометр поменять местами?
4. Какую роль играют ключи K_1 и K_2 ?

Лабораторная работа № 3 – 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Цель работы. Познакомиться с методами исследования электростатических полей. Научиться измерять основные характеристики электростатических полей.

Элементы теории

Экспериментальное исследование электростатического поля в данной работе производится с помощью электролитической ванны. Она представляет собой плоский прямоугольный сосуд с водой, в котором размещены проводящие электроды, создающие исследуемое поле.

Если проводники помещены в однородную слабо проводящую среду, то конфигурация линий тока совпадает с конфигурацией электростатического поля, созданного неподвижными зарядами, расположенными на этих проводниках. Докажем это утверждение.

Запишем уравнение непрерывности для вектора плотности тока:

$$\operatorname{div} \vec{j} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}, \quad (1)$$

где $\vec{j}$ - вектор плотности тока; ρ - объемная плотность электрического заряда. Для стационарного тока в электролите $\rho = \text{const}$, следовательно

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0. \quad (2)$$

Вектор плотности тока с напряженностью электрического поля связывает закон Ома в дифференциальном виде:

$$\vec{j} = \gamma \vec{E}, \quad (3)$$

где γ - удельная электрическая проводимость среды.

Учитывая уравнение, связывающее напряженность поля с потенциалом φ , которое выполняется также для поля стационарного тока:

$$\vec{E} = -\operatorname{grad} \varphi, \quad (4)$$

получим следующее уравнение

$$\vec{j} = -\gamma \cdot \operatorname{grad} \varphi. \quad (5)$$

Для однородной изотропной проводящей среды имеем

$$\operatorname{div} \vec{j} = -\gamma \cdot \operatorname{div} \operatorname{grad} \varphi = \gamma \Delta \varphi = 0 \quad \text{или} \quad \Delta \varphi = 0, \quad (6)$$

где Δ - оператор Лапласа:

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}. \quad (7)$$

Уравнение (6) называется уравнением Лапласа.

В то же время потенциал электрического поля в отсутствие свободных зарядов также подчиняется уравнению Лапласа. Запишем выражение для напряженности поля в виде:

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon \varepsilon_0}. \quad (8)$$

Учтем, что в точках между электрическими зарядами $\rho = 0$, следовательно

$$\operatorname{div} \vec{E} = 0. \quad (9)$$

Подставим выражение (4) в формулу (9), получим

$$\operatorname{div} \operatorname{grad} \varphi = 0 \text{ или } \Delta \varphi = 0. \quad (10)$$

Таким образом, сравнивая (6) и (9), можно сделать вывод, что конфигурация линий тока совпадает с конфигурацией электростатического поля, созданного неподвижными зарядами, расположенными на электродах, создающих поле.

Как было показано выше, электрическое поле можно описывать либо с помощью векторной величины $\vec{E}$, либо с помощью скалярной величины φ . Связь между этими величинами показывает формула (4), которая позволяет по известным значениям φ определить напряженность поля в любой точке.

В проекциях на оси координат соотношение (4) будет иметь следующий вид:

$$E_x = -\frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad E_y = -\frac{\partial \varphi}{\partial y}, \quad E_z = -\frac{\partial \varphi}{\partial z}. \quad (11)$$

В обобщенном виде уравнения (11) для проекции вектора $\vec{E}$ на произвольное направление l можно записать:

$$E_l = -\frac{\partial \varphi}{\partial l}. \quad (12)$$

Для того, чтобы найти обратную связь между напряженностью поля и потенциалом определим работу, совершаемую силами поля над зарядом q при перемещении его из точки 1 в точку 2:

$$A_{1,2} = \int_1^2 q \vec{E} dl. \quad (13)$$

В то же время эта работа может быть определена следующим образом

$$A_{1,2} = W_{\Pi 1} - W_{\Pi 2} = q(\varphi_1 - \varphi_2), \quad (14)$$

где $W_{\Pi 1}$ и $W_{\Pi 2}$ - потенциальная энергия поля в точках 1 и 2, соответственно. Приравняв (13) и (14) и разделив их на q , получим следующее соотношение

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 \vec{E} dl. \quad (15)$$

Для обхода по замкнутому контуру $\varphi_1 = \varphi_2$ и формула (15) принимает вид:

$$\oint \vec{E} dl = 0. \quad (16)$$

Соотношение (16) справедливо только для электростатического поля.

Воображаемая поверхность, все точки которой имеют одинаковый потенциал, называется эквипотенциальной поверхностью. Ее уравнение имеет вид

$$\varphi(x, y, z) = \text{const}. \quad (17)$$

При перемещении по эквипотенциальной поверхности на отрезок dl потенциал не изменяется ($d\phi = 0$). Следовательно, согласно (12) касательная к поверхности составляющая вектора $\vec{E}$ равна нулю. Отсюда следует, что вектор $\vec{E}$ в каждой точке направлен по нормали к эквипотенциальной поверхности, проходящей через данную точку. Приняв во внимание, что вектор $\vec{E}$ направлен по касательной к линии $\vec{E}$, легко понять, что линии напряженности в каждой точке ортогональны к эквипотенциальным поверхностям (рис. 1).

Схема экспериментальной установки показана на рис. 2. Основой установки является ванна, в которую помещены электроды А и В. Ванна заполняется тонким слоем электролита (водой), проводимость которой мала по сравнению с проводимостью металлических электродов А и В. Во избежание поляризации электродов и электролиза электролита питание установки осуществляется переменным током частотой 50 Гц. В пространство между электродами вводится измерительный зонд С. При помещении зонда в электролит включенный в цепь зонда вольтметр будет показывать потенциал исследуемой точки относительно электрода В, если сопротивление среды на участке ВС значительно меньше внутреннего сопротивления вольтметра. Перемещая зонд из одной точки в другую, можно найти эквипотенциальные поверхности (линии, соединяющие точки с одинаковым потенциалом) и по ним построить картину линий напряженности исследуемого поля.

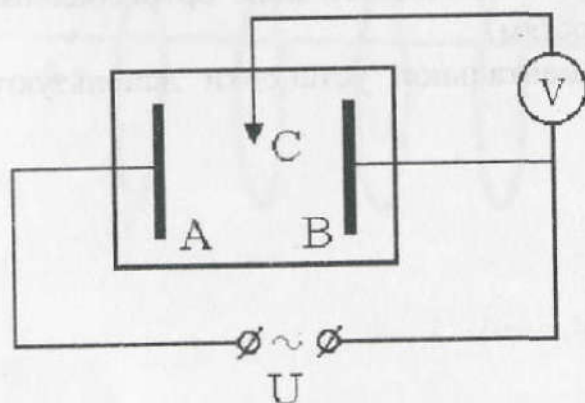


Рис. 2. Схема экспериментальной установки.

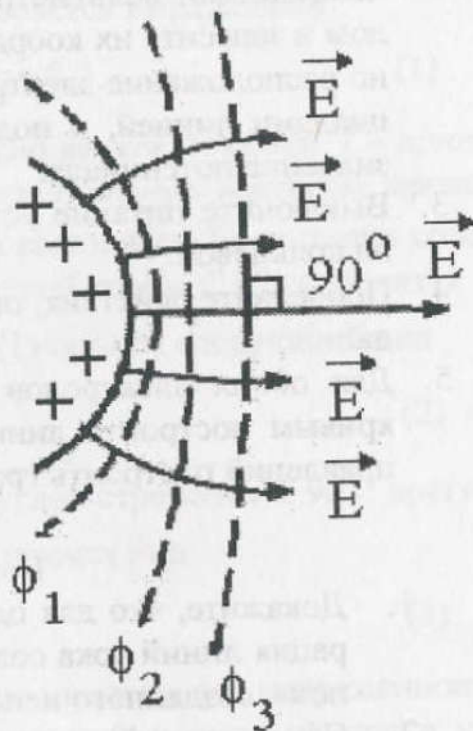


Рис. 1. Изображение структуры электростатического поля с помощью эквипотенциальных поверхностей и линий напряженности.

Порядок выполнения

1. На место сменного электрода установите плоский электрод, налейте в ванну воды. Толщина водного слоя должна составлять не более 5 – 7 мм.
2. Включите питание установки и пользуясь измерительным зондом проведите измерение эквипотенциальных кривых. При измерениях зонд следует держать вертикально. С помощью зонда, наблюдая за показаниями вольтметра, определите точки с одинаковым потенциалом и занесите их координаты на бумагу, указав на ней предварительно расположение электродов. Соедините точки с одинаковыми потенциалами линией, и под каждой эквипотенциальной кривой укажите значение потенциала.
3. Выключите питание установки, замените съемный плоский электрод на кольцевой.
4. Прodelайте действия, описанные в задании 2 для кольцевого электрода.
5. Для обоих электродов по экспериментальным эквипотенциальным кривым построить линии напряженности поля. Для выбранных направлений построить графики зависимости $\varphi(l)$ и $E(l)$.

Контрольные вопросы

1. Докажите, что для однородной слабо проводящей среды конфигурация линий тока совпадает с конфигурацией электростатического поля, созданного неподвижными зарядами.
2. Сформулируйте закон Ома в дифференциальной форме.
3. Дайте определение потенциала и напряженности электрического поля.
4. Какая связь существует между потенциалом и напряженностью электрического поля?
5. Почему линии напряженности электрического поля ортогональны к эквипотенциальным поверхностям?
6. Почему для питания экспериментальной установки используют переменное напряжение?

Лабораторная работа № 3 – 3

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНОИДА

Цель работы. Изучить распределение напряженности магнитного поля на оси соленоида.

Элементы теории

Напряженность магнитного поля цилиндрического соленоида в некоторой точке, лежащей на его оси (рис. 1), определяется выражением

$$H = \frac{NI}{2l} (\cos \beta_1 - \cos \beta_2), \quad (1)$$

где I – сила тока в обмотке соленоида, N – число витков обмотки, l – длина соленоида, β_1 и β_2 – углы между осью соленоида и радиус-вектором, проведенным из рассматриваемой точки C к концам соленоида. Если длина соленоида много больше его диаметра, то для средней точки C β_1 стремится к нулю, а β_2 к 180° . Вследствие этого формула (1) примет следующий вид

$$H = \frac{NI}{l}. \quad (2)$$

На концах соленоида (точки A_1 и A_2) один из углов стремится к 90° , другой – к 0° или 180° , вследствие этого формула (1) примет вид

$$H = \frac{NI}{2l}. \quad (3)$$

Таким образом, сравнивая (2) и (3), можно увидеть, что напряженность магнитного поля в середине соленоида максимальна и уменьшается в направлении к его краям.

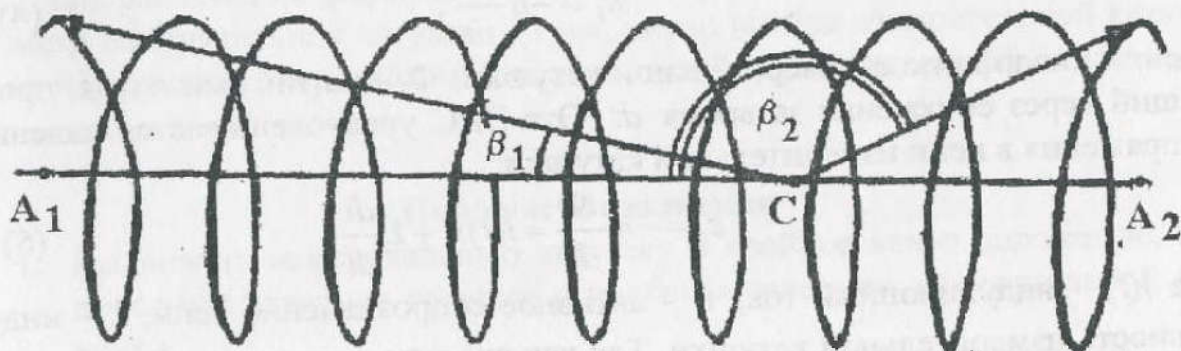


Рис. 1. Цилиндрический соленоид.

Измерить распределение напряженности магнитного поля вдоль оси соленоида можно следующим образом (рис. 2). Обмотку соленоида подключаем к источнику переменного напряжения. В данной работе используется понижающий трансформатор, подключенный к сети переменного тока. Таким образом, в обмотке соленоида протекает переменный ток, который со

дает переменное магнитное поле. Внутри соленоида помещается небольшая измерительная катушка, которая может перемещаться по всей длине соленоида. Обмотка измерительной катушки подключена к вольтметру переменного напряжения. Переменное магнитное поле в обмотке соленоида вызывает возникновение ЭДС индукции в обмотке измерительной катушки. Эта ЭДС измеряется вольтметром. Таким образом, показания вольтметра, подключенного к измерительной катушке пропорциональны напряженности магнитного поля в соленоиде. Установим связь между показаниями вольтметра и напряженностью магнитного поля внутри соленоида.

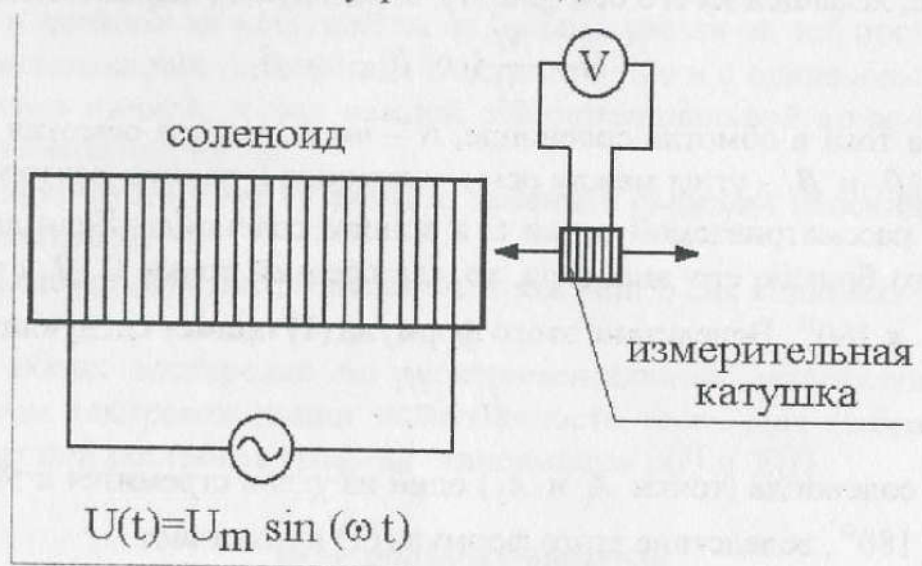


Рис. 2. Схема установки.

Переменное магнитное поле, создаваемое соленоидом, пронизывает витки измерительной катушки, приводя к появлению в ней ЭДС индукции

$$\varepsilon_i = -n \frac{d\Phi}{dt}, \quad (4)$$

где n – число витков измерительной катушки, Φ – магнитный поток, проходящий через ее сечение за время dt . Эта ЭДС уравнивается падением напряжения в цепи измерительной катушки:

$$\varepsilon_i = -n \frac{d\Phi}{dt} = i(t)R + L \frac{di}{dt}, \quad (5)$$

где $i(t)$ – индукционный ток, R – активное сопротивление цепи, L – индуктивность измерительной катушки. Так как входное сопротивление вольтметра много больше активного сопротивления катушки, то можно считать, что R полностью определяется сопротивлением вольтметра.

Проинтегрируем (5) по времени в пределах одного периода синусоидального сигнала напряжения в цепи измерительной катушки:

$$-n \int_0^T \frac{d\Phi}{dt} dt = R \int_0^T i_m dt + L \int_0^T \frac{di}{dt} dt. \quad (6)$$

Учтем, что магнитный поток, создаваемый соленоидом и вызывающий ЭДС индукции в измерительной катушке, равен

$$\Phi = \mu\mu_0 HS, \quad (7)$$

где H – напряженность магнитного поля соленоида, S – площадь сечения измерительной катушки, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная, $\mu = 1$. Изменение магнитного потока можно представить следующим образом:

$$d\Phi = \mu_0 S \cdot dH. \quad (8)$$

Кроме этого учтем, что вольтметр переменного напряжения осуществляет усиление и детектирование входного сигнала, в результате чего его показания соответствуют среднеквадратическому значению напряженности ($U_{ср.кв.} = 0,707U_m$). При этом уравнение (6) можно представить в следующем виде:

$$-n\mu_0 S \int_{+H}^{-H} dH = R \int_0^T I_m dt + L \int_0^T di. \quad (9)$$

В результате интегрирования (10) получим:

$$2n\mu_0 SH = Q_m R, \quad (10)$$

где Q_m – максимальное значение количества электричества, которое проходит через входную цепь вольтметра за один период сигнала T .

Напряжение, которое показывает вольтметр, связано с величиной Q_m следующим образом:

$$U_m = k \cdot Q_m, \quad (11)$$

где k – коэффициент преобразования, зависящий от особенностей схемотехники входных цепей вольтметра.

Таким образом, окончательная формула для определения напряженности магнитного поля соленоида будет выглядеть следующим образом:

$$H = \frac{U_m R}{2n\mu_0 Sk}. \quad (12)$$

Для расчетов по формуле (12) следует принять следующие параметры: Диаметр измерительной катушки 18 мм, число витков измерительной катушки $n=30$, входное сопротивление вольтметра $R=100$ кОм, коэффициент преобразования $k = 10^9$.

Порядок выполнения

1. Выдвинуть измерительную катушку в крайнее левое положение, введя отсчетную отметку с нулевым делением измерительной шкалы.
2. Включить питание установки, включить питание вольтметра. Подождать 10 – 15 секунд, пока в цепях пройдут переходные процессы.
3. Передвигая измерительную катушку, через каждые 5 мм измерять зависимость напряжения U_m от положения измерительной катушки. Результаты записать в таблицу 1.
4. Пользуясь формулой (12) рассчитать для каждого U_m значения напряженности магнитного поля, результаты занести в таблицу 1.

5. По данным таблицы 1 построить график распределения напряженности магнитного поля соленоида $H = f(l)$. Указать на графике области соответствующие центральной части соленоида и краевые области.

Таблица 1.

№ п.п.	1	2	3	...
l , мм				
U_m , В				
H , А/м				

Контрольные вопросы

1. Пользуясь законом Био – Савара – Лапласа выведите формулу напряженности магнитного поля соленоида конечной длины.
2. Почему напряженность магнитного поля соленоида зависит от положения точки, в которой она определяется?
3. Докажите, что напряженность магнитного поля в центре соленоида больше в два раза, чем на его концах.
4. В чем заключается явление электромагнитной индукции?
5. Сформулируйте теорему о циркуляции вектора магнитной индукции и с ее помощью получите формулу для напряженности магнитного поля в центре соленоида на его оси.
6. Объясните суть метода измерения напряженности магнитного поля соленоида, применяемого в данной работе и выведите формулу (12).

Лабораторная работа № 3 – 4 ИЗУЧЕНИЕ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Цель работы. Изучить магнитные характеристики и явление гистерезиса ферромагнетиков.

Элементы теории

Ферромагнетики – это особый класс магнетиков обладающие намагниченностью в отсутствие внешнего магнитного поля. К их числу принадлежат железо, никель, кобальт, гадолиний, их сплавы и соединения, а также некоторые сплавы и соединения марганца и хрома. Ферромагнетики являются сильномагнитными веществами. Их намагниченность существенно превосходит намагниченность *диа-* и *парамагнетиков*, принадлежащих к категории слабомагнитных веществ.

Намагниченность ферромагнетиков зависит от напряженности магнитного поля H сложным образом. На рис. 1 приведена кривая намагниченности ферромагнетика, магнитный момент которого первоначально был равен ну-

лю. Из графика видно, что при некотором значении H намагниченность J достигает насыщения.

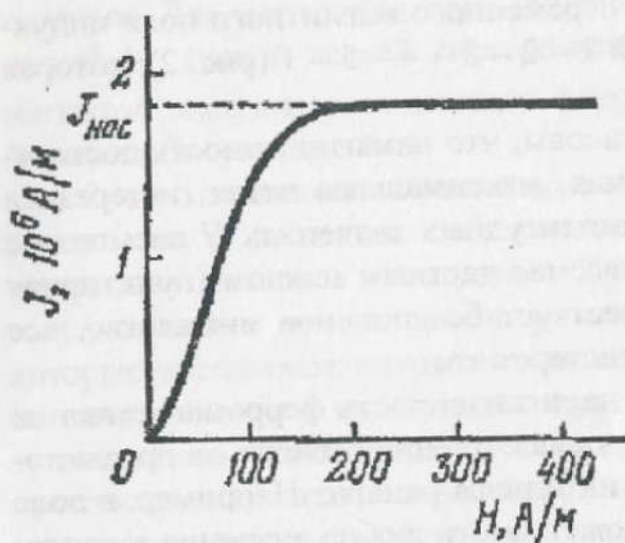


Рис. 1. Кривая намагниченности ферромагнетика.

Для ферромагнетиков характерно также наличие гистерезиса на зависимости B от H (рис. 2). Если довести намагниченность B до насыщения (точка 1 на рис. 2) и затем уменьшать напряженность магнитного поля, то индукция B изменяется не по первоначальной кривой 0 – 1, а в соответствии с кривой 1 – 2. В результате, когда напряженность внешнего поля станет равной нулю (точка 2), намагниченность не исчезает и характеризуется величиной B_r , которая называется остаточной индукцией. Намагниченность имеет при этом значение J_r , называемое остаточной намагниченностью.

Индукция B обращается в нуль лишь под действием поля H_c имеющего направление, противоположное полю, вызвавшему намагничивание. Напряженность H_c называется *коэрцитивной силой*.

Существование остаточной намагниченности делает возможным изготовление постоянных магнитов, то есть тел, которые без затраты энергии на поддержание макроскопических токов обладают магнитным моментом и создают в окружающем пространстве магнитное поле. Постоянный магнит тем

Основная кривая намагниченности в виде зависимости магнитной индукции B от H приведена на рис. 2 (кривая 0 – 1). Так как B и J связаны соотношением

$$B = \mu_0(H + J), \quad (1)$$

то при достижении насыщения B продолжает расти с увеличением H по линейному закону.

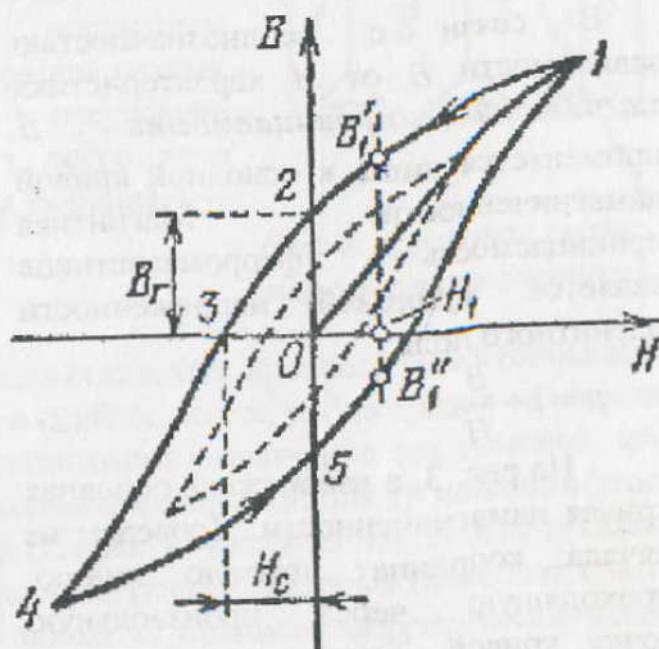


Рис. 2. Зависимость B от H для ферромагнетиков.

лучше сохраняет свои свойства, чем больше коэрцитивная сила материала, из которого он изготовлен.

При действии на ферромагнетик переменного магнитного поля индукция изменяется в соответствии с кривой 1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 1 (рис. 2), которая называется петлей гистерезиса.

Если максимальные значения H таковы, что намагниченность достигает насыщения, получается так называемая максимальная петля гистерезиса (сплошная петля на рис. 2). Если при амплитудных значениях H насыщение не достигается, получается петля, называемая частным циклом (пунктирная петля на рис. 2). Частных циклов существует бесконечное множество, все они лежат внутри максимальной петли гистерезиса.

Гистерезис приводит к тому, что намагниченность ферромагнетика не является однозначной функцией H , она существенно зависит от предыстории образца – от того, в каких полях он находился раньше. Например, в поле напряженности H_1 (рис. 2) индукция может иметь любое значение в пределах от B'_1 до B''_1 .

В связи с неоднозначностью зависимости B от H характеристика магнитной проницаемости μ применяется лишь к основной кривой намагниченности. Магнитная проницаемость ферромагнетиков является функцией напряженности магнитного поля:

$$\mu = 1 + \frac{B}{H}. \quad (2)$$

На рис. 3, а изображена основная кривая намагниченности. Проведем из начала координат прямую линию, проходящую через произвольную точку кривой. Тангенс угла наклона этой прямой пропорционален отношению B/H , т. е. магнитной проницаемости для соответствующего значения H . При увеличении H от нуля угол наклона (а значит и μ) сначала растет. В точке 2 он достигает максимума (прямая 0 – 2 является касательной к кривой), а затем убывает.

Из рис. 3, б видно, что максимальное значение μ достигается несколько раньше, чем насыщение. При неограниченном возрастании H проницаемость асимптотически приближается к единице. Это следует из того, что B в выражении (2) не может превысить значения $B_{\text{нас}}$.

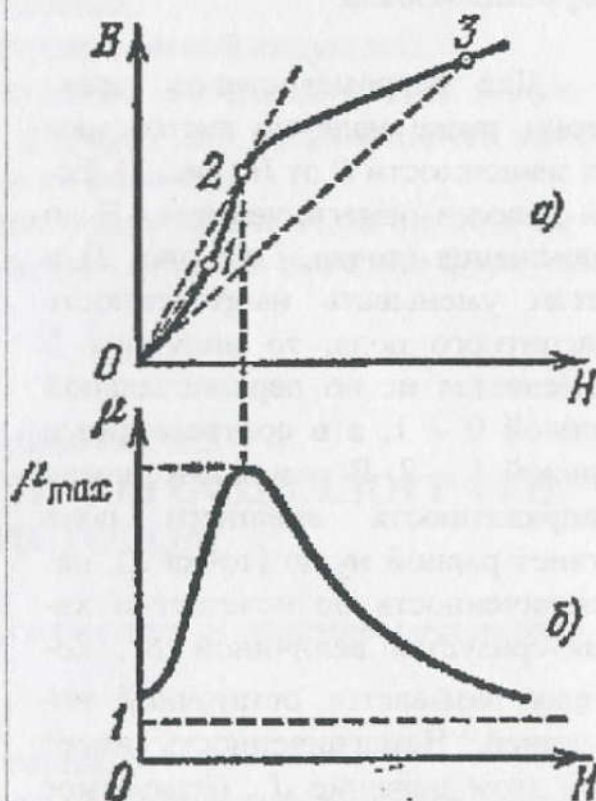


Рис. 3. Связь зависимостей B от H и μ от H .

Величины B_r , H_c , $\mu_{\max}$ являются основными характеристиками ферромагнетика. Если коэрцитивная сила H_c велика, ферромагнетик называется жестким. Для него характерна широкая петля гистерезиса. Ферромагнетик с малой H_c (узкой петлей гистерезиса) называется мягким. Для постоянных магнитов используются жесткие ферромагнетики, а для сердечников трансформаторов — мягкие.

Ответственными за магнитные свойства ферромагнетиков являются собственные (спиновые) магнитные моменты электронов. При определенных условиях в кристаллах могут возникать силы, которые заставляют магнитные моменты электронов выстраиваться параллельно друг другу. В результате возникают области спонтанного (самопроизвольного) намагничивания, которые называют также *доменами*. В пределах каждого домена ферромагнетик спонтанно намагничен до насыщения и обладает определенным магнитным моментом. Направления этих моментов для разных доменов различны (рис. 4), так что в отсутствие внешнего поля суммарный момент всего тела равен нулю. Домены имеют размеры порядка 1—10 мкм.

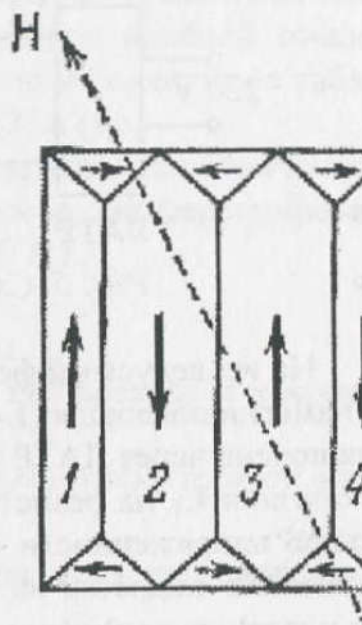


Рис. 4. Доменная структура ферромагнетика

Действие поля на домены на разных стадиях процесса намагничивания оказывается различным. Вначале, при слабых полях, наблюдается смещение границ доменов, в результате чего происходит увеличение тех доменов, моменты которых составляют с направлением внешнего поля H меньший угол. С увеличением H этот процесс идет все дальше, пока домены с меньшими углами (которые обладают в магнитном поле меньшей энергией) не поглотят целиком энергетически менее выгодные домены. На следующей стадии имеет место поворот магнитных моментов доменов в направлении внешнего поля. При этом моменты электронов в пределах домена поворачиваются одновременно, без нарушения строгой параллельности друг другу. Эти процессы являются необратимыми, что и служит причиной гистерезиса.

Для каждого ферромагнетика имеется определенная температура, при которой области спонтанного намагничивания распадаются и вещество утрачивает ферромагнитные свойства. Эта температура называется *точкой Кюри*. При температуре выше точки Кюри ферромагнетик становится обычным парамагнетиком. При охлаждении ферромагнетика ниже точки Кюри снова возникают домены.

Схема экспериментальной установки, которая применяется в данной лабораторной работе для наблюдения петли гистерезиса, показана на рис.

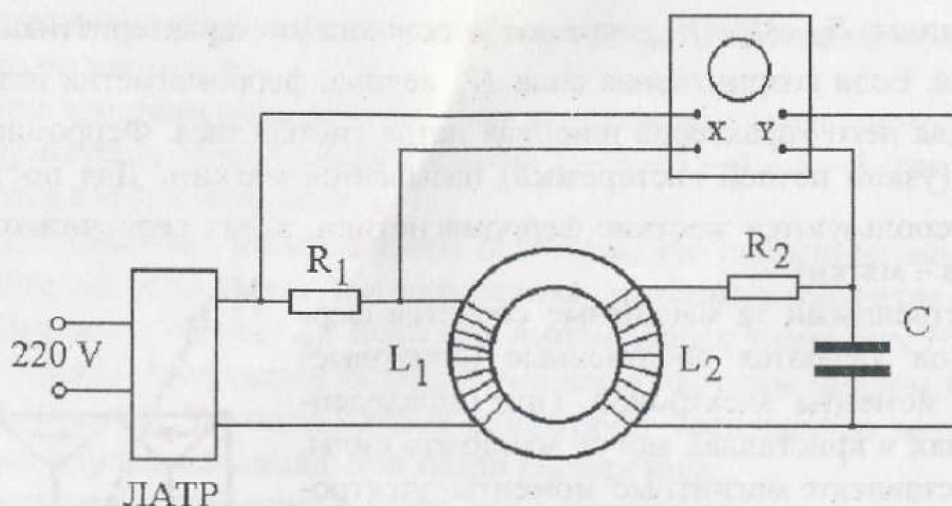


Рис. 5. Схема экспериментальной установки.

На исследуемый ферромагнетик в форме тороида намотаны две катушки: намагничивающая (L_1) и измерительная (L_2). Намагничивающая катушка подключена через ЛАТР к сети переменного тока. При протекании тока в цепи катушки L_1 на резисторе R_1 возникает падение напряжения, пропорциональное напряженности внешнего намагничивающего поля H . Это падение напряжения подается на вход X осциллографа. На вертикальные отклоняющие пластины осциллографа (вход Y) подается напряжение с измерительной катушки L_2 . Таким образом, на экране осциллографа мы можем наблюдать петлю гистерезиса.

Значения напряженности магнитного поля можно рассчитать по следующей формуле:

$$H = \frac{n_1}{R_1} U_X, \quad (3)$$

где n_1 - число витков намагничивающей обмотки на единицу длины средней линии тороида; R_1 - измерительное сопротивление в цепи намагничивающей обмотки (3 кОм); U_X - напряжение по оси X на экране осциллографа.

Значения индукции магнитного поля определяются следующим образом:

$$B = \frac{R_2 C}{N_2 S} U_Y, \quad (4)$$

где $R_2 = 100$ кОм; $C = 1,5$ мкФ; N_2 - число витков измерительной обмотки; S - площадь витка измерительной обмотки; U_Y - напряжение по оси Y на экране осциллографа.

Порядок выполнения

1. Включить питание установки и осциллографа.
2. Добиться с помощью ЛАТРа максимальной площади петли гистерезиса на экране осциллографа. Зарисовать петлю гистерезиса в отчет с указанием масштаба по осям X и Y .

3. По результатам полученным в п. 2. построить петлю гистерезиса в координатах $B=f(H)$. Определить значение коэрцитивной силы, а также значения B и H , соответствующие режиму насыщения.
4. Установить с помощью ЛАТРа нулевое значение напряжения на катушке L_1 , при этом петля гистерезиса свернется в точку. Поместить точку в нижний левый угол экрана осциллографа. Увеличивая напряжение с помощью ЛАТРа измерить координаты крайней точки на петле гистерезиса (точка 1 на рис. 2). Результаты поместить в таблицу 1. Рассчитать значения H и B . По формулам (3) и (4).
5. По данным таблицы 1 построить основную кривую намагниченности в координатах $B=f(H)$. Выполнив графическое дифференцирование зависимости $B=f(H)$, построить график $\mu = f(H)$.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается явление магнитного гистерезиса и какова его природа?
2. Почему на графике зависимости $\mu = f(H)$ присутствует максимум?
3. К какому значению стремиться μ на графике зависимости $\mu = f(H)$ при возрастании H ?
4. Что называют точкой Кюри для ферромагнетика?
5. Дайте определение коэрцитивной силы.
6. Какие ферромагнетики являются мягкими, какие жесткими, где они применяются?

Лабораторная работа № 3 – 5 ИЗУЧЕНИЕ СИЛЫ ЛОРЕНЦА

Цель работы. Исследовать влияние магнитного поля на траекторию движения электронов.

Элементы теории

Если движущаяся заряженная частица попадает под действие электрического и магнитного полей, то на нее действует сила, равная

$$\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{V}\vec{B}]. \quad (1)$$

Выражение (1) было получено экспериментальным путем Лоренцем и называется *силой Лоренца*.

Будем рассматривать случай, когда на движущуюся частицу действует только магнитное поле. В этом случае формула (1) будет иметь вид

$$\vec{F} = q[\vec{V}\vec{B}], \quad (2)$$

где q – заряд частицы, $\vec{V}$ – скорость ее движения, $\vec{B}$ – вектор магнитной индукции поля. Таким образом, сила Лоренца действует только на заряженные частицы, скорость движения которых отлична от нуля.

Если раскрыть векторное произведение в (2), то получим

$$F = qVB \cdot \sin(\alpha), \quad (3)$$

где α - угол между векторами $\vec{V}$ и $\vec{B}$. Величина угла α определяет вид траектории заряженной частицы при ее движении в магнитном поле. Если $\alpha = 90^\circ$, то частица движется по дуге окружности. Если $\alpha \neq 90^\circ$, то частица движется по спирали, ось которой параллельна вектору $\vec{B}$. Далее будем рассматривать случай, когда $\alpha = 90^\circ$, при этом (3) запишется следующим образом:

$$F = qVB. \quad (4)$$

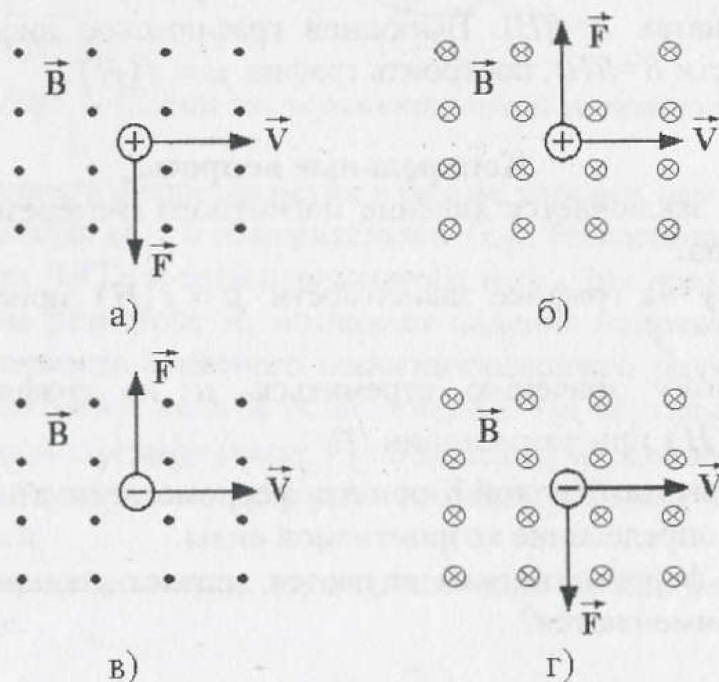


Рис. 1. Направление силы Лоренца.

Направление силы Лоренца для положительно заряженной частицы можно определить по правилу *левой руки*: если ладонь левой руки расположить таким образом, чтобы в нее входили линии вектора $\vec{B}$, четыре вытянутых пальца расположить по направлению вектора скорости $\vec{V}$, то отогнутый в сторону большой палец покажет направление силы Лоренца. На отрицательный заряд сила Лоренца действует в противоположном направлении. На рис. 1 показаны различные варианты направления силы Лоренца для отрицательно и положительно заряженных частиц в зависимости от направления вектора магнитной индукции.

Из рис. 1 видно, что сила Лоренца всегда перпендикулярна скорости движения заряженной частицы, поэтому сила Лоренца не совершает работу. Она изменяет только траекторию движения частицы, не изменяя ее модуль скорости.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 2. Основой установки является индикаторная лампа ИЛ. Катод лампы испускает узкий электронный луч в направлении ковшеобразного анода, который покрыт люми-

нофором. При попадании электронов на люминофор возникает свечение. Сила Лоренца, вызывающая отклонение электронного луча, создается с помощью электромагнитной катушки L , размещенной под лампой. Таким образом, линии вектора магнитной индукции перпендикулярны плоскости анода и перпендикулярны вектору $\vec{V}$.

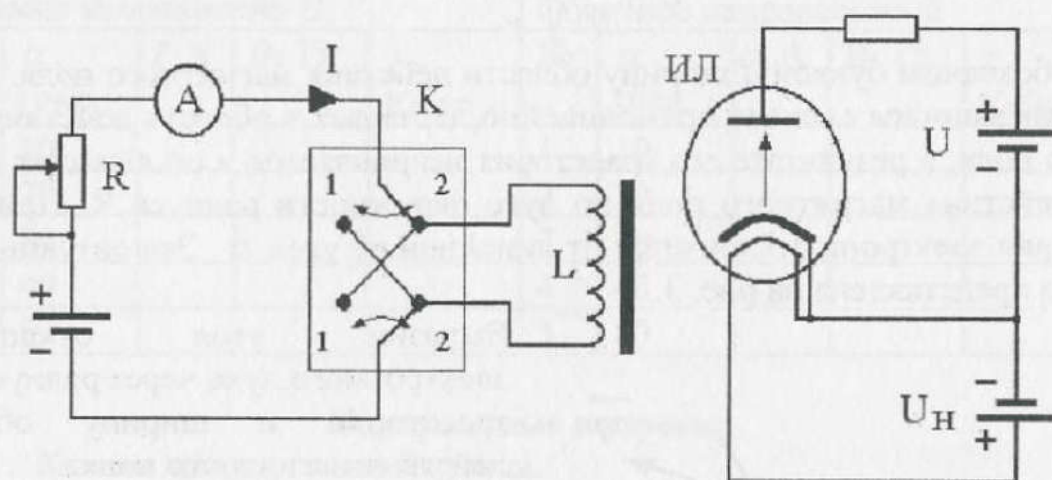


Рис. 2. Схема экспериментальной установки.

Изменяя направление и величину магнитной индукции посредством изменения направления и величины силы тока I в обмотке электромагнита, можно наблюдать отклонение электронного луча на экране лампы. Направление тока меняется с помощью ключа K , который имеет два положения. Величина силы тока изменяется переменным резистором R и контролируется амперметром.

С помощью экспериментальной установки можно определить отношение заряда электрона к его массе: $\gamma = q/m$. Выведем формулу, с помощью которой, зная угол отклонения электронного луча можно определить γ .

Для силы Лоренца, согласно второму закону Ньютона можно записать:

$$F = ma = m \frac{V^2}{R}, \quad (5)$$

где R — радиус траектории движения электрона под действием силы Лоренца. Приравнявая (4) и (5), выразим радиус траектории:

$$R = \frac{mV}{qB} = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{V}{B}, \quad (6)$$

Электрон приобретает скорость V за счет ускорения в электрическом поле между анодом и катодом, созданным источником постоянного напряжения U (рис. 2). В связи с этим для кинетической энергии движения электрона запишем:

$$E = qU = \frac{mV^2}{2}. \quad (7)$$

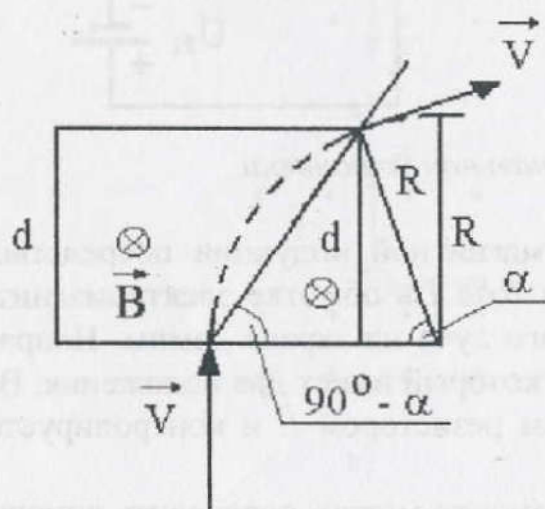
Отсюда скорость электрона:

$$V = \sqrt{\frac{2qU}{m}} = \sqrt{2\gamma U}. \quad (8)$$

Подставив (8) в (6) получим для радиуса траектории электрона следующее выражение:

$$R = \frac{1}{B} \cdot \sqrt{\frac{2U}{\gamma}}. \quad (9)$$

Обозначим буквой d ширину области действия магнитного поля. Электрон, двигавшийся сначала прямолинейно, попадает в область действия магнитного поля, в результате его траектория искривляется и он выходит из области действия магнитного поля по дуге окружности радиуса R . При этом траектория электрона отклоняется от линейной на угол α . Эта ситуация схематично представлена на рис. 3.



Выразим угол отклонения электронного луча через радиус дуги траектории и ширину области действия магнитного поля:

$$\sin(\alpha) = \frac{d}{R}. \quad (10)$$

Подставив в выражение (9) значение R из (10), получим окончательно:

$$\gamma = \frac{2U}{d^2 B^2} \cdot \sin^2 \alpha. \quad (11)$$

Рис. 3. Траектория движения электрона в магнитном поле.

Порядок выполнения

1. Включите питание установки, дайте ей прогреться до тех пор, пока на экране не появится электронный луч.
2. С помощью переключателя K установите определенное направление индукции магнитного поля. Изменяя с помощью переменного резистора R силу тока I в обмотке электромагнита, измерьте углы отклонения электронного луча α по шкале индикаторной лампы. Результаты занесите в таблицу 1.
3. Переключателем K установите противоположное направление магнитного поля. Изменяя с помощью переменного резистора R силу тока I в обмотке электромагнита, измерьте углы отклонения электронного луча α по шкале индикаторной лампы. Результаты занесите в табл. 1.
4. С помощью приложенного к установке графика зависимости $B = f(I)$ определите для каждого значения I соответствующее значение индукции магнитного поля B . Результаты занесите в таблицу 1.

5. Пользуясь формулой (11) рассчитайте γ для каждой пары значений α и B . Произведите статистическую обработку результатов эксперимента и определите погрешность. В качестве окончательного результата запишите усредненное значение γ .

Таблица 1.

Прямое направление $\vec{B}$					Обратное направление $\vec{B}$				
№	α , град.	I , А	B , Тл	γ , Кл/кг	№	α , град.	I , А	B , Тл	γ , Кл/кг
1	10				1	10			
2	20				2	20			
3	30				3	30			
4	40				4	40			
5	50				5	50			

Контрольные вопросы

1. Какова природа силы Лоренца.
2. Каким образом можно определить направление силы Лоренца для отрицательно заряженных и положительно заряженных частиц?
3. Как зависит форма траектории движения заряженной частицы в зависимости от величины угла между векторами $\vec{V}$ и $\vec{B}$?
4. Изменяется ли модуль скорости заряженной частицы при действии на нее силы Лоренца?
5. Чему равна сила Лоренца при движении электрона вдоль линии вектора магнитной индукции?
6. Каким образом в данной работе определяется значение γ ?

Лабораторная работа № 3 – 6 ИЗУЧЕНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ В КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ

Цель работы. Изучить явление резонанса в колебательном контуре при вынужденных колебаниях.

Элементы теории

Вынужденными называют колебания, происходящие в системе под действием какого-либо внешнего периодически изменяющегося фактора. Вынужденные электрические колебания возникают в колебательном контуре при подключении к нему источника переменной ЭДС.

Рассмотрим случай, когда источник переменной ЭДС подключен параллельно контуру (рис. 1). Выведем для этого случая уравнение вынужденных колебаний.

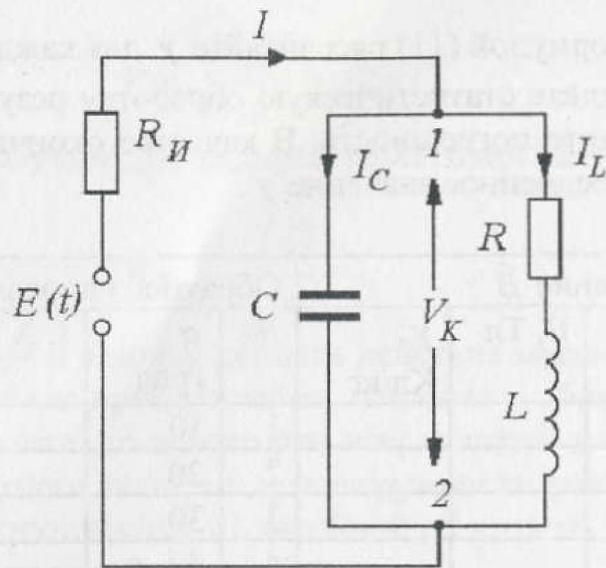


Рис. 1. Схема колебательного контура.

Согласно первому закону Кирхгофа для токов в точке 1 цепи, изображенной на рис. 1 можно записать следующее выражение:

$$I = I_L + I_C, \quad (1)$$

где I – ток, протекающий в ветви источника ЭДС, I_L – ток в ветви, содержащей индуктивность, I_C – ток в ветви, содержащей емкость.

Напряжение, приложенное к контуру между точками 1 и 2 можно представить в следующем виде:

$$V_K = L \frac{dI_L}{dt} + RI_L, \quad (2)$$

где составляющая $L \frac{dI_L}{dt}$ связана с возникновением ЭДС самоиндукции.

Ток в ветви, содержащей емкость можно представить в следующем виде:

$$I_C = C \cdot \frac{dV_K}{dt}, \quad (3)$$

Продифференцируем (2) по t , подставим результат в (3) и (1), получим дифференциальное уравнение

$$\frac{d^2 I_L}{dt^2} + \frac{R}{L} \cdot \frac{dI_L}{dt} + \frac{I_L}{LC} = \frac{1}{LC} \cdot I_0 \sin(\omega t). \quad (4)$$

Введем следующие обозначения: $\delta = \frac{R}{2L}$, $\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$. При этом уравнение (4) можно записать в следующем виде:

$$\frac{d^2 I_L}{dt^2} + 2\delta \frac{dI_L}{dt} + \omega_0^2 I_L = \omega_0^2 I_0 \sin(\omega t). \quad (5)$$

Уравнение (5) является дифференциальным уравнением вынужденных колебаний в колебательном контуре, его решение можно записать в виде

$$I_L = I_{L0} \sin(\omega t + \varphi), \quad (6)$$

где

$$I_{L0} = \frac{I_0}{\omega C \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}}. \quad (7)$$

Полное сопротивление колебательного контура Z на переменном токе (выражение под знаком корня в (7)) зависит от частоты ω . Причем, $|Z|$ принимает максимальное значение при $\omega \cong \omega_0$, где ω_0 называется резонансной частотой. Выражение для резонансной частоты колебательного контура имеет вид

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} \cdot \left(1 - \frac{1}{Q^2} \right)}, \quad (8)$$

где Q - добротность колебательного контура.

Максимальное значение сопротивления контура имеет место на резонансной частоте и составляет величину

$$Z_{\max} = RQ^2 = \frac{L}{RC}. \quad (9)$$

Добротность связана с параметрами колебательного контура следующим образом

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (10)$$

Если в неразветвленной части цепи (рис. 1) поддерживать постоянную по амплитуде силу тока $I = I_0 \sin(\omega t)$, изменяя при этом частоту сигнала ω , то будет изменяться $|Z|$ и падение напряжения на контуре V_K . Причем амплитуда V_K достигнет максимума при $\omega \cong \omega_0$. Это явление называют резонансом в колебательном контуре и графически изображается в виде зависимости $V_K = f(\omega)$ или $|Z| = f(\omega)$ (рис. 2). Высота и ширина резонансных пиков зависит от активного сопротивления контура R (рис. 2).

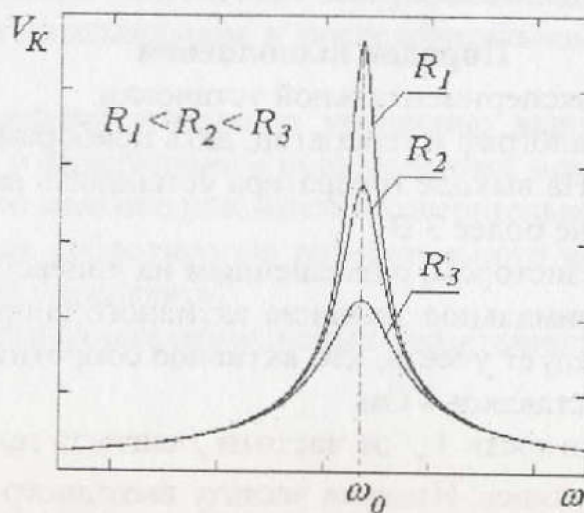


Рис. 2. Резонансные кривые при различных значениях активного сопротивления контура.

Измеряя ширину резонансной кривой $\Delta\omega$ на высоте 0,7 от максимального значения (рис. 3) можно определить добротность контура, пользуясь следующим соотношением:

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{1}{Q}. \quad (11)$$

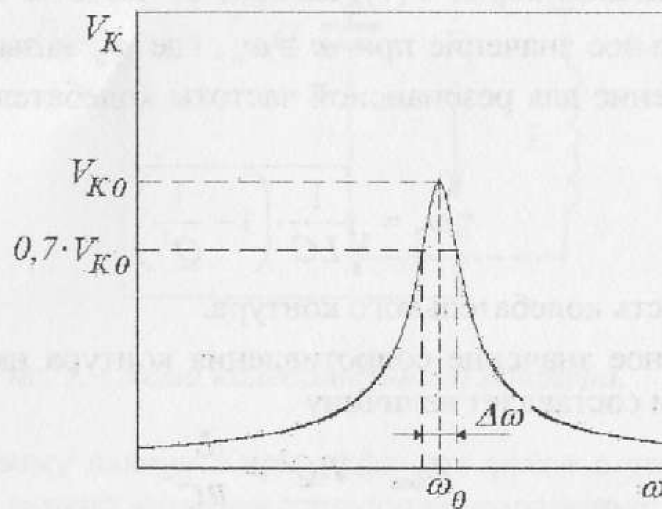


Рис. 3. Определение добротности колебательного контура

Экспериментальная установка, используемая в данной работе, построена по схеме на рис. 1. В качестве источника синусоидальной ЭДС используется универсальный лабораторный генератор. Падение напряжения на контуре V_K измеряется с помощью электронного осциллографа.

Измерение резонансной кривой $V_K = f(\omega)$ производится следующим образом. С генератора на схему подают синусоидальное напряжение и изменяя его частоту f ($\omega = 2\pi f$), измеряют осциллографом амплитудное значение напряжения V_K на выходе схемы. При этом необходимо поддерживать постоянное значение амплитуды напряжения на выходе генератора.

Порядок выполнения

1. Собрать схему экспериментальной установки.
2. Включить осциллограф и генератор, дать приборам прогреться в течение 1 минуты. На выходе генератора установить амплитуду выходного напряжения не более 3 В.
3. Переменным резистором, размещенным на лицевой панели установки, установить минимальное значение активного сопротивления контура R . При этом следует учесть, что активное сопротивление катушки индуктивности составляет 4 Ом.
4. Измерить зависимость V_K от частоты f сигнала генератора. Для этого проделать следующее. Изменяя частоту выходного сигнала генератора f , измерить для каждого значения частоты амплитуду напряжения V_K с помощью осциллографа. При этом необходимо следить, чтобы ам-

плитуда сигнала на выходе генератора не изменялась. При измерениях развертка осциллографа должна быть отключена. Амплитуда V_K при этом соответствует высоте вертикального штриха на экране осциллографа. Результаты измерений занести в таблицу 1.

5. Произвести измерения двух зависимостей V_K от частоты f , соответствующих разным значениям R . Результаты поместить в таблицу 1.
6. По данным таблицы 1 построить графики зависимости $V_K = f(\omega)$ для разных значений R .
7. По построенным графикам с помощью формулы (11) определить значения добротности контура при различных R . Результаты расчета поместить в таблицу 1.

Таблица 1.

	№ п.п.	1	2	...	20
$R = 4 \text{ Ом}$	$f, \text{Гц}$				
	ω				
	$V_K, \text{В}$				
$R = \text{Ом}$	$f, \text{Гц}$				
	ω				
	$V_K, \text{В}$				
$R = \text{Ом}$	$f, \text{Гц}$				
	ω				
	$V_K, \text{В}$				

Контрольные вопросы

1. Что называют колебательным контуром, какими параметрами он характеризуется?
2. Какие колебания называются вынужденными, каким образом они создаются в параллельном и последовательном колебательных контурах?
3. Выведите дифференциальное уравнение вынужденных колебаний для контура с параллельным подключением источника ЭДС.
4. В чем состоит явление резонанса в колебательном контуре?
5. Что называют добротностью колебательного контура и каким образом ее можно определить?
6. Чем определяется вид резонансных характеристик?

Лабораторная работа № 3 – 7

ИЗУЧЕНИЕ ЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ В КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ

Цель работы. Исследовать затухающие колебания в колебательном контуре.

Элементы теории

Любой реальный колебательный контур обладает активным сопротивлением R (рис. 1). Энергия колебаний, запасенная в контуре, постепенно превращается в тепловую энергию за счет активного сопротивления. Вследствие этого свободные колебания затухают. Выведем уравнение затухающих колебаний в контуре, обладающем активным сопротивлением R .

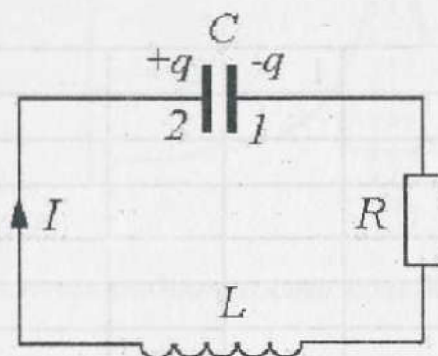


Рис. 1. Колебательный контур с активным сопротивлением

Закон Ома для цепи на рис. 1 можно записать следующим образом:

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

где $\varphi_1 - \varphi_2$ - разность потенциалов между точками 1 и 2, E_s - ЭДС самоиндукции. Представим (1) в следующем виде:

$$IR = -\frac{q}{C} - L \frac{dI}{dt}. \quad (2)$$

Разделим (2) на L , учтем, что $I = dq/dt$, $dI/dt = d^2q/dt^2$, в результате получим

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dq}{dt} + \frac{1}{LC} q = 0. \quad (3)$$

Примем во внимание, что

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}, \quad (4)$$

и введем обозначение

$$\beta = \frac{R}{2L}, \quad (5)$$

в результате уравнение (3) примет следующий вид

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = 0. \quad (6)$$

Уравнение (6) является дифференциальным уравнением затухающих колебаний.

При условии, что $\beta^2 < \omega_0^2$, то есть $R^2/4L^2 < 1/LC$, решение уравнения (6) имеет вид

$$q = q_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \alpha), \quad (7)$$

где α - начальная фаза, β - коэффициент затухания, $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$. Приняв во внимание (4) и (5), можно записать для частоты затухающих колебаний следующее выражение

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}. \quad (8)$$

Таким образом, частота затухающих колебаний ω меньше собственной частоты ω_0 .

Разделив обе части выражения (7) на C , получим напряжение на конденсаторе

$$U = U_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \alpha). \quad (9)$$

Выражение (7) описывает сложное колебание, график которого показан на рис. 2. Из рис. 2 видно, что амплитуда такого колебания уменьшается по закону $U_0 e^{-\beta t}$. Причем темп уменьшения амплитуды определяется коэффициентом затухания β . Колебания такого рода (рис. 2) называются затухающими.

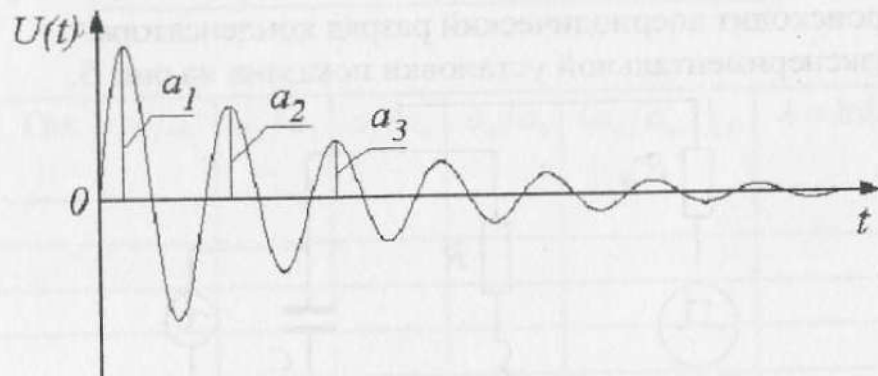


Рис. 2. Затухающие колебания.

Затухание колебаний принято характеризовать логарифмическим декрементом затухания:

$$\lambda = \ln \left(\frac{a(t)}{a(t+T)} \right) = \beta T, \quad (10)$$

где $a(t)$ и $a(t+T)$ - амплитуды колебания, разделенные периодом T .

На практике для определения λ можно использовать следующую формулу:

$$\lambda = \ln \left(\frac{a_i}{a_{i+1}} \right), \quad (11)$$

где a_i и a_{i+1} - соседние значения амплитуды колебания на рис. 2 ($i=1, 2, \dots, n$).

Логарифмический декремент затухания обратен числу колебаний N_e , совершаемых за время, в течение которого амплитуда уменьшается в e - раз:

$$\lambda = 1/N_e. \quad (12)$$

Величина λ определяется параметрами колебательного контура:

$$\lambda = \frac{\pi R}{L \omega}. \quad (13)$$

Если затухание в контуре не велико ($\beta^2 \ll \omega_0^2$), то

$$\lambda = \pi R \sqrt{\frac{C}{L}}. \quad (14)$$

Другой важной характеристикой колебательного контура является добротность, которая обратно пропорциональна декременту затухания:

$$Q = \frac{\pi}{\lambda} = \pi N_e. \quad (15)$$

Из (15) следует, что добротность тем выше, чем большее число колебаний успевает совершить система, прежде чем их амплитуда уменьшится в e - раз. В случае слабого затухания

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (16)$$

Если затухание в контуре достаточно велико, то $\beta^2 \gg \omega_0^2$, то вместо колебаний происходит апериодический разряд конденсатора.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 3.

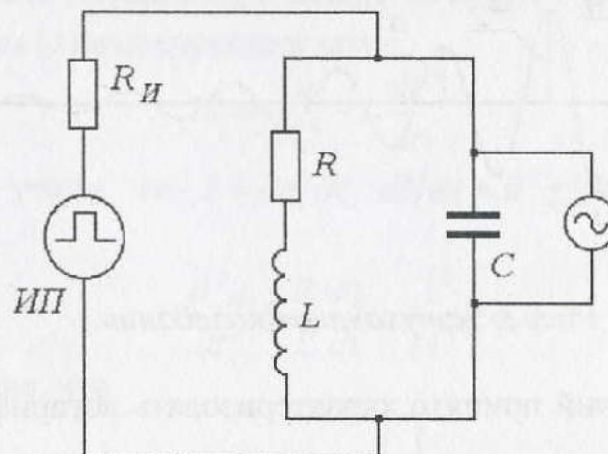


Рис. 3. Схема экспериментальной установки.

На вход колебательного контура, содержащего переменное активное сопротивление R через резистор R_n подается сигнал с источника прямоугольных импульсов напряжения (ИП). Для измерения сигнала затухающих колебаний напряжения к обкладкам конденсатора подключается осциллограф.

Порядок выполнения

1. Собрать экспериментальную схему в соответствии с рис. 3. Включить питание источника прямоугольных импульсов и осциллограф.
2. Установить движок переменного резистора R на нулевую отметку. При этом учесть, что активное сопротивление контура равно 4 Ом.
3. Добиться устойчивого изображения сигнала затухающих колебаний на экране осциллографа и зарисовать его в отчет. Измерить значения амплитуды колебаний, различающихся на период (рис. 2). Результаты занести в таблицу 1.
4. Прodelать измерения в соответствии с п. 3 для других четырех значений активного сопротивления контура. Результаты занести в таблицу 1.
5. Пользуясь формулой (15) рассчитать значения логарифмического декремента затухания для каждого значения R . В целях упрощения процедуры расчета пользуйтесь таблицей 2 для сохранения промежуточных данных. Построить график зависимости $\lambda = f(R)$.
6. Пользуясь формулой (15) рассчитать значения добротности контура для каждого значения R . Построить график зависимости $Q = f(R)$.

Таблица 1.

№ п.п.	R , Ом	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
1						
2						
...						
5						

Таблица 2.

№ п.п.	R , Ом	a_1/a_2	a_2/a_3	a_3/a_4	a_4/a_5	$(a_n/a_{n+1})_{CP}$	$\lambda = \ln(a_n/a_{n+1})_{CP}$
1							
2							
...							
5							

Контрольные вопросы

1. Дайте определение затухающих колебаний.
2. Выведите дифференциальное уравнение затухающих колебаний.
3. Дайте определение логарифмического декремента затухания.
4. Дайте определение добротности колебательного контура. Какими параметрами она определяется?
5. Можно ли считать гармоническими затухающие колебания?
6. Приведите примеры реальных радиотехнических систем, в которых возникают затухающие колебания.

Лабораторная работа № 3 – 8

ПРОВЕРКА ЗАКОНА ОМА

В ЦЕПЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Цель работы. Экспериментально проверить выполнение закона Ома для цепей переменного тока, содержащих индуктивность и емкость.

Элементы теории

Если к концам проводника с активным сопротивлением R_0 приложено переменное напряжение

$$U = U_0 \sin(\omega t), \quad (1)$$

где U_0 - амплитуда напряжения, $\omega = 2\pi f$ - циклическая частота; то в проводнике возникает переменный ток

$$I = \frac{U_0}{R_0} \sin(\omega t) = I_0 \sin(\omega t). \quad (2)$$

Если в цепи переменного тока содержатся так называемые реактивные элементы – индуктивность и емкость, то между током и напряжением возникает сдвиг фаз φ :

$$I = I_0 \sin(\omega t \pm \varphi). \quad (3)$$

Если последовательно с активным сопротивлением R_0 в цепи включена индуктивность L , то под действием приложенного напряжения (1) возникает ток, описываемый выражением (3) с амплитудой

$$I_0 = \frac{U_0}{\sqrt{R_0^2 + \omega^2 L^2}}. \quad (4)$$

Сдвиг фаз между током и напряжением составляет

$$\operatorname{tg}(\varphi) = \frac{\omega L}{R_0}, \quad (5)$$

при этом ток в индуктивном элементе схемы отстает от напряжения на $\pi/2$.

Величина

$$X_L = \omega L \quad (6)$$

называется индуктивным сопротивлением.

Величина $Z = \sqrt{R_0^2 + \omega^2 L^2}$ называется полным или «кажущимся» сопротивлением.

Рассмотрим последовательное соединение активного сопротивления и емкости. Амплитудное значение силы тока в такой цепи можно записать следующим образом

$$I_0 = \frac{U_0}{\sqrt{R_0^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}}. \quad (7)$$

Сдвиг фаз между током и напряжением в этом случае составляет

$$\operatorname{tg}(\varphi) = \frac{1}{R_0 \omega C}. \quad (8)$$

В данном случае ток, текущий через конденсатор, опережает напряжение по фазе на $\pi/2$.

Величина

$$X_c = \frac{1}{\omega C} \quad (9)$$

называется емкостным сопротивлением.

Полное («кажущееся») сопротивление цепи в этом случае составляет

$$Z = \sqrt{R_0^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}. \quad (10)$$

Если в цепь последовательно включены активное сопротивление, индуктивность и емкость, то амплитудное значение возникшего в цепи тока будет составлять

$$I_0 = \frac{U_0}{\sqrt{R_0^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}, \quad (11)$$

сдвиг фаз

$$\operatorname{tg}(\varphi) = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R_0}. \quad (12)$$

В этом случае полное сопротивление цепи равно

$$Z = \sqrt{R_0^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}. \quad (13)$$

При использовании электроизмерительных приборов следует учитывать, что они измеряют не амплитудные, а так называемые эффективные значения токов $I_{\text{эф}}$ и напряжений $U_{\text{эф}}$. Амплитудные и эффективные значения связаны следующим образом (для синусоидального сигнала):

$$I_{\text{эф}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}, \quad (14)$$

$$U_{\text{эф}} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}. \quad (15)$$

Следует также учесть, что при последовательном включении R_0 - сумма всех активных сопротивлений в цепи. В связи с этим следует учитывать активную составляющую сопротивления катушки индуктивности, которая определяется активным сопротивлением обмотки.

Индуктивность катушки L можно определить используя цепь переменного тока (рис. 1) и закон Ома в виде:

$$I_0 = \frac{U_0}{Z}. \quad (16)$$

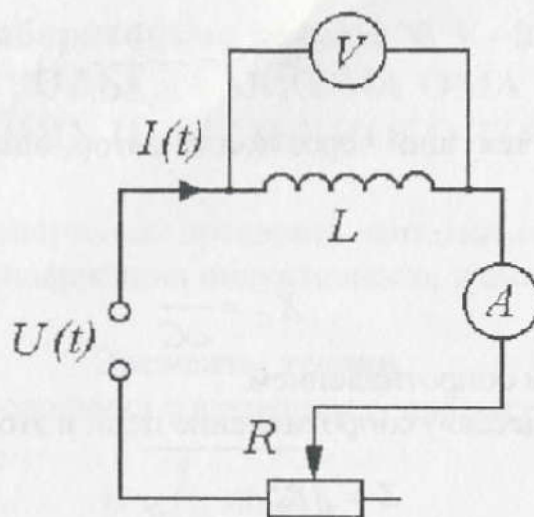


Рис. 1. Экспериментальная схема №1

Известно, что полное сопротивление цепи на рис. 1 составляет

$$Z = \sqrt{R_0^2 + \omega^2 L^2}, \quad (17)$$

где $\omega = 2\pi f$. В данной лабораторной работе используется источник переменного напряжения промышленной частоты $f = 50$ Гц. Используя (17) для индуктивности можно записать следующее

$$L = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{Z^2 - R_0^2}. \quad (18)$$

Значение Z можно вычислить по (16), измерив предварительно силу тока в цепи и падение напряжения на катушке индуктивности. Величина R_0 определяется активным сопротивлением обмотки катушки индуктивности.

Порядок выполнения

1. Измерить омметром активное сопротивление катушки индуктивности R_0 . Полученный результат записать в отчет.
2. Собрать схему на рис. 1. Изменяя реостатом R величину тока в цепи, измерить пять значений тока и напряжения. Данные занести в табл. 1.

Таблица 1.

№ п.п.	I, A	U, B	Z
1			
...			
5			
Среднее			

3. Пользуясь формулой (16) вычислить значение полного сопротивления Z . Результат записать в отчет.
4. Пользуясь формулой (18) вычислить значение L для катушки индуктивности. Результат записать в отчет.

5. Собрать схему на рис. 2. Изменяя реостатом R величину тока в цепи, измерить пять значений тока и напряжения. Данные занести в табл. 2.

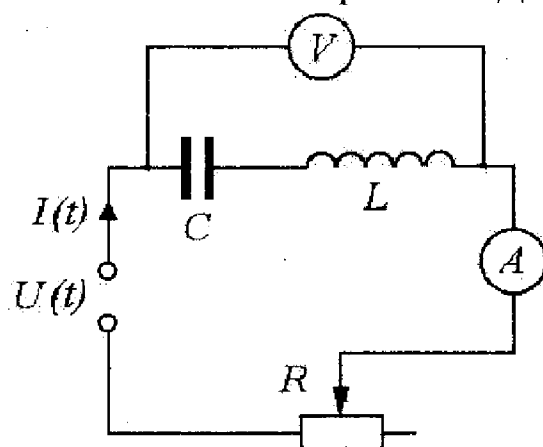


Рис. 2. Экспериментальная схема № 2.

Таблица 2.

№ п.п.	I, A	U, B	Z
1			
...			
5			
Среднее			

- С помощью формулы (16) вычислить значение полного сопротивления Z . Результат записать в отчет.
- Рассчитать Z по формуле (13) используя известные значения R_0 , L , C .
- Сравнить значения Z полученные в п.п. 6 и 7. Сделать вывод о применимости закона Ома для цепей переменного тока.

Контрольные вопросы

- Дайте определения индуктивного и емкостного сопротивления.
- Каким образом связаны амплитудные и эффективные значения?
- Выведите закон Ома для цепи переменного тока, в которой емкость и индуктивность включены параллельно.
- Дайте определение индуктивности, от чего она зависит.
- В результате чего в цепях переменного тока возникает сдвиг фаз между током и напряжением?
- Выведите закон Ома для цепи переменного тока, в которой параллельно индуктивности включено активное сопротивление.

СОДЕРЖАНИЕ

1. <i>Лабораторная работа № 3 – 1.</i> Измерение электрического сопротивления мостовым методом.....	3
2. <i>Лабораторная работа № 3 – 2.</i> Исследование электростатического поля.....	7
3. <i>Лабораторная работа № 3 – 3.</i> Исследование магнитного поля соленоида.....	11
4. <i>Лабораторная работа № 3 – 4.</i> Изучение ферромагнетиков осциллографическим методом.....	14
5. <i>Лабораторная работа № 3 – 5.</i> Изучение силы Лоренца.....	19
6. <i>Лабораторная работа № 3 – 6.</i> Изучение вынужденных колебаний в колебательном контуре.....	23
7. <i>Лабораторная работа № 3 – 7.</i> Изучение затухающих колебаний в колебательном контуре.....	28
8. <i>Лабораторная работа № 3 – 8.</i> Проверка закона Ома в цепях переменного тока.....	32

Подписано в печать 24.03.18. Формат 84х108/32
Гарнитура Таймс. Печать офсетная.
Бумага мелованная. Усл. Печ. л. – 1,89.
Тираж 50 экз.

Издательство Современного технического университета
390048, г. Рязань, ул. Новоселов, 35А.
(4912) 30-06-30, 30 08 30