

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

# **ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ**

## **ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

**Чебоксары 2015**

УДК 537.8 (076.5)  
ББК В315.2я73  
Э 45

*Рецензенты:*

*В.С. Аbruков* – доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой прикладной физики и нанотехнологий ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова»;

*А.И. Китаев* – канд. физ.-мат. наук, доцент, зав. кафедрой общей и теоретической физики ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный педагогический университет имени И.Я. Яковлева»

*Авторы:*

В.Г. Алексеев, А.Л. Иванов, С.М. Казаков, Б.К. Лаптенков, Л.К. Митрюхин, Н.И. Петров, В.И. Семенов, Г.М. Сорокин, О.В. Христофоров, С.И. Чучалов, А.К. Шурбин

**Электромагнетизм:** лаб. практикум / В.Г. Алексеев,  
**Э 45** А.Л. Иванов, С.М. Казаков и др. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2015. – 109 с.

ISBN 978-5-7677-2183-2

Составлен в соответствии с действующей программой по физике для студентов технических факультетов вузов. Содержит описания лабораторных работ, выполняемых на комплекте типового лабораторного оборудования «Электричество и магнетизм» ЭМФ.001 РБЭ (910) производства ООО «Учебная техника», (г. Челябинск). Даны методические указания и требования, предъявляемые к выполнению лабораторных работ по физике.

Для студентов I курса технических факультетов.

Ответственный редактор доктор физ.-мат. наук,  
профессор С.М. Казаков

Утверждено Учебно-методическим советом университета

ISBN 978-5-7677-2183-2

УДК 537.8 (076.5)

ББК В315.2я73

© Издательство Чувашского  
университета, 2015

© Коллектив авторов, 2015

## **ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ И ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

Настоящий практикум содержит 16 лабораторных работ по разделу «Электричество и магнетизм», каждая из которых рассчитана на два академических часа. Лабораторные работы выполняются на комплекте типового лабораторного оборудования «Электричество и магнетизм» ЭМФ.001 РБЭ (910) – Челябинск: ООО «Учебная техника».

Основными компонентами комплекса являются: блок генераторов напряжений с наборным полем, блок моделирования полей с проводящими планшетами, набор миниблоков «Электричество и магнетизм», блок мультиметров, персональный компьютер с платой ввода-вывода данных, коннектор. Проведение экспериментов допускает использование компьютеризованных вариантов стендов, в которых измерения производятся с помощью виртуальных приборов. Это отражено в описаниях лабораторных работ в разделе «Порядок выполнения эксперимента». Для более детального рассмотрения электрических схем для экспериментов следует обратиться к [1].

В зависимости от специфики факультетов и учебных групп студенты могут выполнять одно или несколько упражнений. Все лабораторные работы выполняются бригадами по два человека в строгом соответствии с утвержденным графиком. К выполнению лабораторных работ студенты могут приступить только после сдачи допуска и проверки собранной электрической схемы преподавателем или лаборантом.

При выполнении лабораторных работ студенты обязаны соблюдать правила внутреннего распорядка и техники безопасности.

После окончания работы установка должна быть немедленно отключена от источника питания, а результаты измерений предъявлены преподавателю. Только после этого электрическая схема может быть разобрана, а рабочий стол приведен в порядок.

Лабораторная работа № 1  
**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ТОКОМ В ПРОВОДЯЩЕМ ЛИСТЕ**

**Приборы и принадлежности:** блок моделирования полей (БМП), набор сменных планшетов с различной конфигурацией электродов.

**Цель работы:** ознакомление с основными характеристиками электрического поля и построение эквипотенциальных и силовых линий для поля, создаваемого различными конфигурациями электродов.

### Теоретическое введение

Электрическое поле – это особый вид материи, существующей в пространстве вокруг заряда или заряженного тела, в котором на внесенный в нее другой заряд действуют кулоновские силы. Электрическое поле характеризуется в каждой точке двумя величинами: силовой – вектором электрической напряженности  $\vec{E}$  и энергетической – потенциалом  $\varphi$ . Напряженностью электрического поля в данной точке называется сила  $\vec{F}$ , действующая на единственный положительный заряд  $q_0$ , помещенный в эту точку поля:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}. \quad (1)$$

Для графического изображения электрического поля применяются силовые линии, т.е. линии, касательные в каждой точке которых совпадают с направлением вектора напряженности. По густоте силовых линий можно судить об интенсивности электрического поля в разных его точках. Для однородного поля число силовых линий, проходящих через единицу площади, нормальной к этим линиям, равно значению вектора напряженности  $\vec{E}$ :

$$\frac{\Delta N}{\Delta S} = E. \quad (2)$$

Силовые линии электрического поля исходят от положительного заряда и замыкаются на отрицательном заряде.

Если электрическое поле создано несколькими зарядами, то результирующая напряженность  $\vec{E}_p$  в любой точке поля равна

геометрической сумме напряженностей, создаваемых каждым зарядом в отдельности

$$\vec{E}_p = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i \quad (3)$$

Потенциалом электростатического поля в данной точке называется скалярная величина, численно равная потенциальной энергии единичного положительного заряда, помещенного в данную точку поля

$$\varphi = \frac{w}{q_0} \quad (4)$$

В СИ потенциал измеряется в вольтах (В).

Разность потенциалов между двумя точками электрического поля численно равна работе электрических сил при перемещении единичного положительного заряда из одной точки в другую:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{12}}{q_0} \quad (5)$$

Эта работа не зависит от траектории перемещения заряда, а определяется только потенциалами исходной и конечной точек перемещения.

Между потенциалом и напряженностью существует дифференциальная связь:

$$\vec{E} = -grad\varphi, \quad (6)$$

т.е. при движении вдоль силовой линии потенциал уменьшается наибольшим образом.

Из (6) следует, что  $E = \frac{-d\varphi}{dr}$ ;  $d\varphi = -E dr$ .

Интегральная связь между  $\vec{E}$  и  $\varphi$  имеет вид:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 E dr = \int_1^2 E dl \cos \alpha = \int_1^2 (\vec{E} d\vec{l}), \quad (7)$$

где  $d\vec{l}$  – показывает элементарное перемещение в электрическом поле.

Геометрическое место точек электрического поля, потенциалы которых одинаковы, называется эквипотенциальной поверхностью или поверхностью равного потенциала, т.е.  $\varphi = const$ .

Вектор напряженности в данной точке электрического

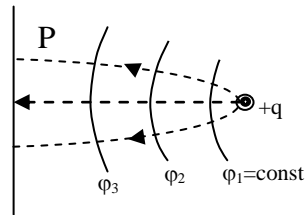


Рис. 1.1

поля перпендикулярен (нормален) к эквипотенциальной поверхности, проведенной через эту точку. На рис.1.1 графически изображено электрическое поле, образованное положительным точечным зарядом  $q$  и отрицательно заряженной плоскостью  $P$ . Сплошные линии – эквипотенциальные поверхности с потенциалами  $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \dots$ , пунктирные – силовые линии.

### Описание экспериментальной установки и методики измерений

В данной работе для исследования электрических полей, созданных электродами различных конфигураций, используется блок моделирования полей (БМП). Он служит для моделирования плоскопараллельных электрических полей полем постоянного тока в проводящем листе. Общий вид блока с установленным на нём планшетом показан на рис. 1.2.

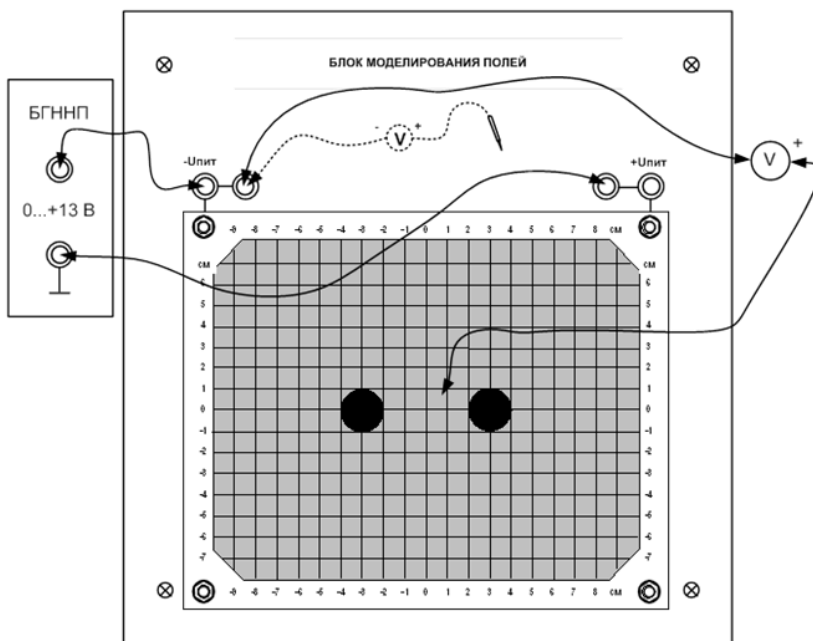


Рис. 1.2

На гнёзда  $+U_{\text{пит}}$  и  $-U_{\text{пит}}$  подаётся питание от регулируемого источника напряжения  $0 \dots 15$  В, которое подводится проводами с нижней стороны планшета к медным электродам. Поверхность планшета покрыта проводящей краской и в ней возникает ток. Эквипотенциальные линии поля постоянного тока снимаются по точкам с помощью вольтметра и переносятся на бумагу. Они аналогичны эквипотенциальным линиям электростатического поля, создаваемого заряженными протяжёнными проводниками.

### Порядок выполнения эксперимента

1. Установите на блок моделирования полей один из вариантов конфигурации проводящего листа, представленных на рис. 1.3-1.6 (планшеты 1–4).

Планшет № 1

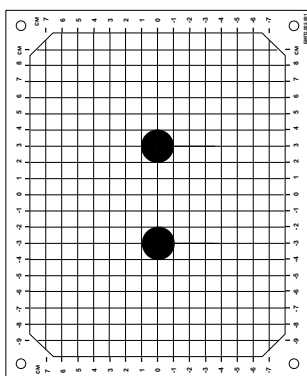


Рис. 1.3

Планшет № 2

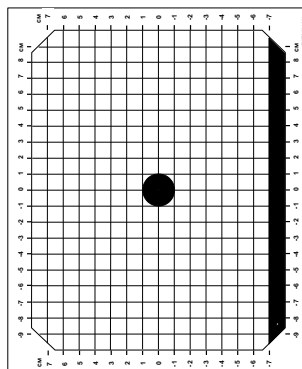


Рис. 1.4

2. Приготовьте в масштабе 1:1 рисунки расположения электродов с координатной сеткой, совпадающие с рисунками на планшетах 1-4.

3. Подключите питание и мультиметр в режиме вольтметра, как показано на рис. 1.2.

Планшет № 3

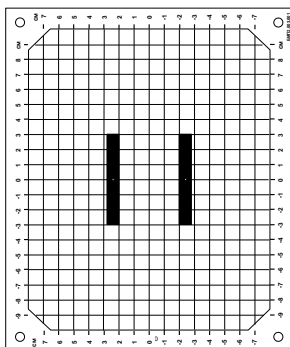


Рис. 1.5

Планшет № 4

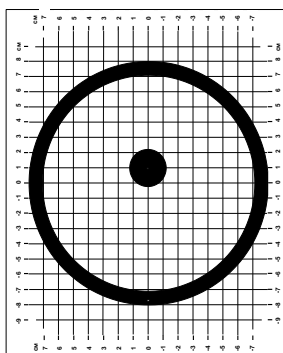


Рис. 1.6

4. Включите источник питания и убедитесь, что один из электродов имеет потенциал, равный нулю, а другой – потенциал, равный напряжению источника питания.

5. Выберите такое напряжение питания  $U = 10 \dots 15$  В и шаг изменения потенциала  $\Delta U$  (например 1; 2 или 2,5 В), чтобы на картинке поля получилось 7...10 эквипотенциальных линий.

6. Перемещая зонд от точки нулевого потенциала по оси симметрии к другому электроду, найдите точки с потенциалами  $\Delta U$ ,  $2 \Delta U$ ,  $3 \Delta U$  ... Найденные точки отмечайте на подготовленном рисунке с координатной сеткой.

7. Перемещая зонд из точки с потенциалом  $\Delta U$  вокруг электрода (слегка приближаясь или удаляясь от него), найдите точки равного потенциала и отмечайте их на рисунке. Точки равного потенциала соедините плавной кривой. Аналогично постройте другие эквипотенциальные линии.

*Примечание:* в каждом варианте проводящего листа имеются одна или две оси симметрии, поэтому можно ограничиться исследованием половины или четверти проводящей области листа.

Пользуясь известными правилами графического построения картины поля, по эквипотенциальным линиям электростатического поля постройте силовые линии напряжённости поля.

Вычислите напряженность электрического поля в двух-трёх точках на рисунке ( $E \cong \Delta U / \Delta l$ ) и покажите направление вектора напряженности в этих точках.

### Контрольные вопросы

1. Написать и сформулировать закон Кулона.
2. Объяснить физический смысл понятий напряженности, потенциала электрического поля и разности потенциалов между двумя точками электрического поля.
3. В чем состоит принцип суперпозиции полей?
4. Записать дифференциальную и интегральную связь между напряженностью и потенциалом.
5. Докажите, что эквипотенциальные поверхности (линии) перпендикулярны силовым линиям электрического поля.
6. Как доказать, что электрическое поле является потенциальным?
7. Начертить силовые и эквипотенциальные линии для электрического поля, созданного двумя электродами (рис. 1.7).

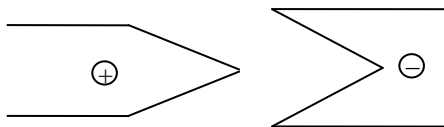


Рис. 1.7

**Литература:** 2. Гл. 11, §§ 78-86; 3. Гл. 13, §§ 3-4; Гл. 14, §§ 1-2; 4. Гл.1, §§ 5-8, 13-14.

### Лабораторная работа № 2

#### ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКА И ЕЁ ЗАВИСИМОСТЬ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

**Приборы и принадлежности:** миниблок «Сегнетоэлектрик», блок генераторов напряжений с наборным полем, коннектор, трансформатор, блок мультиметров, компьютер.

**Цель работы:** исследование основных диэлектрических свойств сегнетоэлектриков в зависимости от напряженности внешнего электрического поля

## Теоретическое введение

Сегнетоэлектриками называется особая группа диэлектриков, которая ниже определенной температуры или в некотором интервале температур обладает самопроизвольной (спонтанной) поляризацией, т.е. находятся в поляризованном состоянии при отсутствии внешнего электрического поля. Наличие спонтанной поляризации определяет ряд особых свойств сегнетоэлектриков:

- высокую диэлектрическую проницаемость;
- нелинейную зависимость диэлектрической проницаемости от температуры и наличие точки Кюри;
- нелинейную зависимость вектора спонтанной поляризации и диэлектрической проницаемости от напряженности внешнего электрического поля;
- диэлектрический гистерезис;
- пьезоэффект.

При температурах вдали от точки Кюри у сегнетоэлектриков, как и у обычных диэлектриков, относительная диэлектрическая проницаемость монотонно увеличивается с повышением температуры.

Вблизи точек Кюри даже небольшие внешние поля способны вызвать большую индуцированную поляризацию. Зависимость диэлектрической проницаемости вблизи точки Кюри от температуры представлена на рис. 2.1. Диэлектрические проницаемости в точках Кюри имеют резкие пики, повышающиеся в некоторых случаях до значения порядка  $10^5$ .

Самопроизвольная поляризация возникает в веществах, имеющих доменную структуру. Домен – макроскопическая область, внутри которой электрические моменты отдельных частиц равны по величине и расположены параллельно. Для обычных диэлектриков приближенно выполняется линейное соотношение между векторами поляризации  $\vec{P}$  и напряженностью поля  $\vec{E}$  в виде

$$\vec{P} = \chi \epsilon_0 \vec{E}, \quad (1)$$

где  $\chi$  – диэлектрическая восприимчивость вещества;  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная, зависящая от выбора системы единиц.

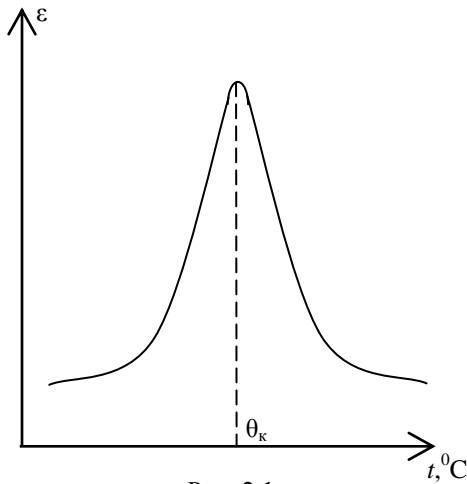


Рис. 2.1

Поляризация диэлектрика, возникающая под действием внешнего электрического поля с напряженностью  $\vec{E}_0$ , приводит к образованию в веществе электрического поля, направленного противоположно внешнему. В результате этого суммарное поле  $\vec{E}$  в диэлектрике ослаблено в  $\epsilon$  раз, т.е.  $\vec{E} = \frac{\vec{E}_0}{\epsilon}$ . Учитывая соотношение, между  $\epsilon$  и  $\chi$  как  $\epsilon = 1 + \chi$ , выражение (1) можно записать в виде

$$\vec{P} = \epsilon_0(\epsilon - 1)\vec{E}, \quad (2)$$

где  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость (одна из основных величин, характеризующих диэлектрик). Так как для сегнетоэлектриков  $\epsilon \gg 1$ , то для них соотношение (2) можно представить в виде

$$P = \epsilon\epsilon_0 E = \epsilon_a E, \quad (3)$$

где  $\epsilon_a = \epsilon\epsilon_0$  абсолютная диэлектрическая проницаемость вещества. Если у обычных диэлектриков  $\epsilon$  не зависит от  $\vec{E}$  и слабо меняется с изменением температуры, то у сегнетоэлектриков зависимость ее от температуры и напряженности внешнего поля проявляется интенсивно и имеет специфический характер.

Влияние температуры настолько велико, что при нагревании выше некоторой критической температуры, называемой точкой Кюри, сегнетоэлектрик становится обычным диэлектриком, происходит фазовый переход. Эти особенности сегнетоэлектриков объясняются наличием в них спонтанно поляризованных областей, называемых доменами.

Обратный переход вещества из сегнетоэлектрической фазы при повышении температуры выше точки Кюри вызывается интенсивным тепловым движением, разрушающим направленное смещение ионов в соседних элементарных ячейках.

Самопроизвольная поляризация в кристалле, ориентированная в одном направлении, происходит в ограниченной области кристалла, называемой доменом. Можно считать, что образец состоит из множества доменов, направления поляризованности которых различны, и результирующий вектор поляризации образца в целом равен нулю. При помещении образца в достаточно сильное электрическое поле он становится однодоменным. Под воздействием поля домены с поляризованностями, направленными параллельно внешнему полю, будут расти за счет доменов с другими направлениями поляризованности.

Поляризация сегнетоэлектрика в переменном электрическом поле, как и намагниченность ферромагнетика в переменном магнитном поле, будет иметь гистерезисный характер. Зависимость поляризации от напряженности  $E$  переменного электрического поля показана на рис. 2.2.

Кривая  $OABC$  изображает поляризацию сегнетоэлектрика, на который наложили электрическое поле. В электрическом поле поляризация происходит в результате процесса индуцированной поляризации и процесса изменения направленной спонтанной поляризации. Если поле недостаточно велико, чтобы вызвать переориентацию доменов, то возникающая поляризация линейно зависит от  $\vec{E}$  по формуле (1) и является индуцированной. Она возникает как в обычном диэлектрике и исчезает при снятии поля. Участок  $OA$  кривой  $OABC$  связан с индуцированной поляризованностью –  $P_{\text{инд}}$ .

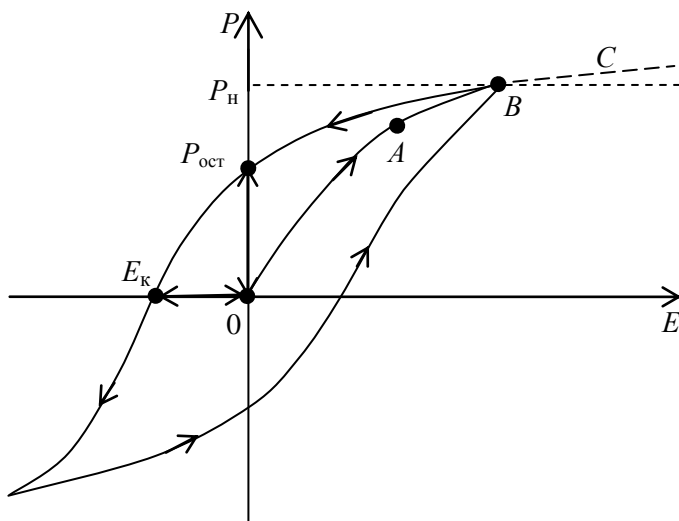


Рис. 2.2

Следует учитывать, что поляризация увеличивается и проявляется по всей кривой; но с увеличением напряженности поля  $E$  преобладающей является спонтанная поляризация —  $\vec{P}_{сп}$ , связанная с переориентацией доменов. Поляризация нарастает (участок  $AB$ ) до тех пор, пока не наступит состояние насыщения (участок  $BC$ ) и все домены окажутся ориентированными в направлении поля. Кристалл становится как бы состоящим из одного домена. Дальнейшее возрастание  $P$  на участке  $BC$  происходит вследствие увеличения  $P_{инд}$ . Если же уменьшать напряженность поля, поляризация данного кристалла изменяется по кривой  $CP_{ост}$ . Когда внешнее поле будет уменьшено до нуля, некоторые домены останутся ориентированными в прежнем направлении и в кристалле обнаружится остаточная поляризация  $P_{ост}$ . Индуцированная поляризация  $P_{инд}$  при напряженности поля, стремящемся к нулю, уменьшается линейно до нуля.

Эти положения иллюстрируются на рис. 2.2. Кристалл будет деполаризован, если приложить поле напряженностью  $E_k$ , называемое коэрцитивным полем, противоположное первоначальному. При дальнейшем увеличении поля все домены переориенти-

руются в направлении поля и цикл завершится, если изменить направление поля еще раз. Таким образом, зависимость между поляризацией и напряженностью (формула 3) описывается петлей гистерезиса, которая является одной из важных характеристик сегнетоэлектрического кристалла.

### Описание экспериментальной установки и методики измерений

Принципиальная схема опытной установки изображена на рис. 2.3.

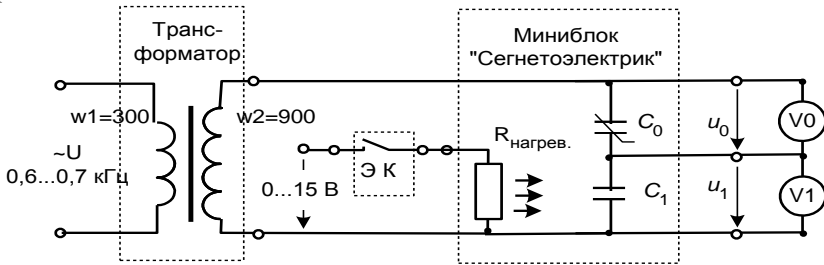


Рис. 2.3

Синусоидальное напряжение подаётся через повышающий трансформатор на цепь, состоящую из последовательно соединённых линейного конденсатора  $C_1$  и нелинейного конденсатора  $C_0$  типа К10-17 с изоляцией из сегнетоэлектрика. Заряды на этих конденсаторах одинаковы и пропорциональны напряжению  $U_1$ :

$$q = C_1 U_1.$$

Напряжение  $U_1$  подаётся на вертикальный вход электронного или виртуального осциллографа, а  $U_0$  – на горизонтальный. На экране осциллографа появляется зависимость  $q(U)$  для нелинейного конденсатора. По ней можно рассчитать поляризационную характеристику  $P(E)$ :

$$E = \frac{u_0}{d}, \text{ где } d \text{ – толщина диэлектрика.}$$

$P = D - \epsilon_0 E = \frac{C_1 u_1}{S} - \epsilon_0 E$ , где  $S$  – площадь обкладок конденсатора.

Нагревание конденсатора осуществляется специальным резистором  $R_{\text{нагрев}}$  от регулируемого источника постоянного напряжения. Регулирование нагрева можно осуществлять как вручную, так и автоматически с помощью виртуального прибора «Термометр/термостат» и миниблока «Электронный ключ». Измерение температуры производится с помощью термопары мультиметром или виртуальным термометром.

Точка Кюри диэлектрика конденсатора К10-17 лежит в области отрицательных температур, поэтому в данной работе она не определяется.

### Порядок выполнения эксперимента

1. Соберите лабораторную установку согласно схеме, изображенной на рис. 2.4 и установите пределы измерения вольтметра  $V_0 - 100$  В, а вольтметра  $V_1 - 20$  В, используя блок мультиметров.

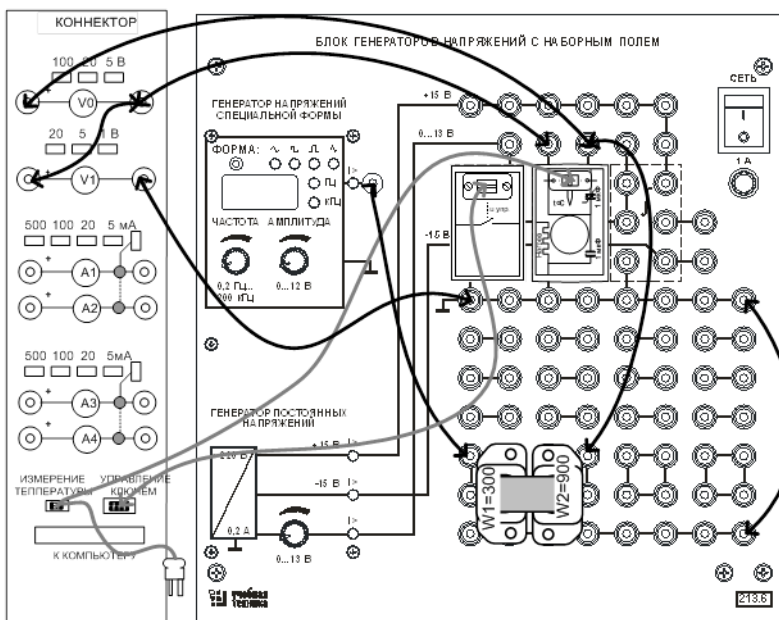


Рис. 2.4

2. Снять экспериментально кулон-вольтовую характеристику нелинейного конденсатора  $q(U)$  при различных температурах. При одном из значений температуры рассчитать и построить поляризационную характеристику диэлектрика  $P = P(E)$  и зависимость относительной диэлектрической проницаемости от напряжённости электрического поля  $\varepsilon = \varepsilon(E)$ , приняв площадь поверхности обкладки конденсатора  $S = 300 \text{ мм}^2$  и толщину диэлектрика  $d = 0,01 \text{ мм}$ .

*Предупреждение: амплитуда напряжения на нелинейном конденсаторе вследствие резонансных явлений может достигать 100 В. Для уменьшения синфазного сигнала на входе коннектора и снижения искажений строго соблюдайте полярность подключения входов коннектора, указанную на схеме опыта.*

*Можно использовать блок виртуальных приборов:*

1. Включите компьютер и откройте блок виртуальных приборов «Приборы I». Активизируйте в верхнем окне этого блока прибор  $V_0$ , а в третьем сверху –  $V_1$  и установите род измеряемой величины – «Амплитуда».

2. Включите виртуальный осциллограф, «подключите» к его первому каналу сигнал  $V_0$ , а к третьему – сигнал  $V_1$ . Установите длительность развёртки 200 мкс/дел.

3. Включите блок генераторов напряжений, установите на генераторе напряжений специальной формы синусоидальный сигнал частотой 0,6...0,7 кГц максимальной амплитуды.

4. Убедитесь, что на виртуальном осциллографе появилось изображение примерно одного периода двух сигналов: кривая белого цвета соответствует изменению напряжения на нелинейном конденсаторе  $U_0$ , кривая зелёного цвета – изменению напряжения на линейном конденсаторе  $U_1$ . При необходимости сместите изображение по горизонтали, в центр экрана.

5. Включите режим X-Y осциллографа и убедитесь, что на экране появилось изображение кулон-вольтовой характеристики конденсатора. При этом на вход X нужно подать напряжение  $U_0$  (канал 1), а на вход Y – напряжение  $U_1$  (канал 3). Петля гистерезиса данного типа конденсаторов весьма узкая, на осциллографе она наблюдается как одна линия.

6. Зафиксируйте масштабы осциллографа нажатием кнопок 1 и 3 на блоках входов. При этом кнопки приобретают красный цвет, и в дальнейшем масштабы автоматически изменяться не будут.

7. Уменьшите синусоидальное напряжение до нуля и, увеличивая его шаг за шагом до максимально возможного напряжения генератора, записывайте в таблицу амплитуды напряжений на линейном конденсаторе –  $U_1$  и на нелинейном –  $U_0$ .

$U_0$ , В	$U_1$ , В	$E$ , В/м	$P$ , Кл/м <sup>2</sup>	$\varepsilon = \Delta P / (\varepsilon_0 \Delta E)$	$E_{\text{ср}}$ , В/м
0					
10					
20					
30					
40					
50					
60					
70					

8. Рассчитайте поляризационную характеристику диэлектрика  $P = P(E)$  и зависимость  $\varepsilon = \varepsilon(E)$ . Выберите масштабы и постройте графики.

9. При максимальном значении амплитуды приложенного напряжения перерисуйте кулон-вольтовую характеристику конденсатора в отчёт или сделайте копию экрана осциллографа.

10. Откройте виртуальный прибор «Термометр/термостат», установите первое значение температуры нагрева и, когда она будет достигнута, снова перерисуйте кривую с экрана осциллографа на график. Повторяйте этот опыт до полного спрямления кулон-вольтовой характеристики.

### Контрольные вопросы

1. Опишите основные механизмы поляризуемости атомов и ионов в диэлектрике.
2. В чем состоит явление поляризации диэлектриков? Какие типы поляризации имеют место в диэлектриках? В чем сущность гистерезиса в сегнетоэлектриках?
3. Какие вещества относят к сегнетоэлектрикам?
4. Дайте определение вектора поляризации. Как он связан с поверхностной плотностью связанных зарядов?
5. Расскажите о доменном характере поляризации сегнетоэлектриков. Какие изменения в доменной структуре ответственны за различные участки основной кривой поляризации.
6. В чем физический смысл диэлектрической проницаемости?
7. Как величина диэлектрической проницаемости сегнетоэлектриков зависит от напряженности электрического поля?
8. Как величина диэлектрической проницаемости сегнетоэлектриков зависит от температуры? Нарисуйте график этой зависимости.
9. Что такое сегнетоэлектрики I и II рода и их области применения?
10. В чем состоит явление гистерезиса, наблюдаемое для сегнетоэлектриков? Какие параметры сегнетоэлектриков можно определить с помощью петли гистерезиса?

**Литература:** 2. Гл. 11, §91; 3. Гл. 15, §§1-2,5; 4. Гл.2, §§1-9.

### Лабораторная работа № 3 ИЗМЕРЕНИЕ ЗАРЯДА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРА

**Приборы и принадлежности:** блок генераторов напряжений с наборным полем, блок мультиметров, набор конденсаторов, миниблоки «Интегратор» и «Переключатель».

**Цель работы:** произвести градуировку интегратора, т.е. определить емкость конденсатора, установленного внутри миниб-

лока «Интегратор», считая её неизвестной. Определить емкость конденсатора, установленного вне миниблока «Интегратор».

### Теоретическое введение

Конденсатором называется система из двух и более проводников, электрическое поле которых полностью локализовано между ними. Емкость  $C$  конденсатора численно равна заряду  $q$  на его обкладках, который изменяет напряжение  $U$  между обкладками на 1 В:

$$C = \frac{q}{U}. \quad (1)$$

Напряжение  $U$  равно разности потенциалов  $\varphi_1 - \varphi_2$  между обкладками:  $U = \varphi_1 - \varphi_2$ .

Емкость конденсаторов зависит от их размеров и формы, электрических свойств заключенного внутри диэлектрика. В случае плоского конденсатора емкость определяется выражением:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды,  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная,  $S$  – площадь пластин,  $d$  – расстояние между пластинами.

При последовательном соединении конденсаторов в батарею емкость батареи рассчитывается по формуле:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}. \quad (3)$$

При их параллельном соединении емкость батареи равна:

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n. \quad (4)$$

Для измерения емкости конденсаторов применяются различные методы. Одним из наиболее распространенных среди них является метод зарядки и разрядки конденсатора.

### Описание экспериментальной установки и методики измерений

Принципиальная схема опытной установки изображена на рис. 3.1.

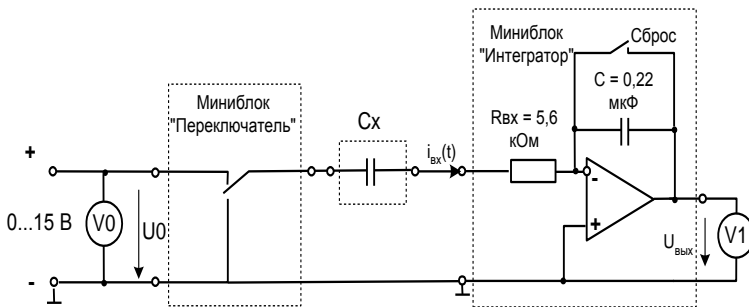


Рис. 3.1

При переключении переключателя в этой схеме конденсатор  $C_x$  заряжается, либо разряжается. В любом из этих случаев зарядный или разрядный ток протекает через входную цепь интегратора и напряжение на его выходе изменяется на величину, пропорциональную протекшему через ёмкость  $C_x$  заряду

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{1}{C} \int_0^t i_{\text{ВХ}} dt = \frac{1}{C} q_x.$$

Напряжение на конденсаторе  $C_x$  при этом изменяется скачком от 0 до напряжения генератора  $U_0$ , либо наоборот. Поэтому

$$q_x = CU_{\text{ВЫХ}} \quad \text{и} \quad C_x = \frac{q_x}{U_0} = C \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_0}.$$

### Порядок выполнения эксперимента

1. Соберите цепь согласно схеме (рис. 3.1), разместив миниблоки «Интегратор» и «Переключатель» на отведенных для них местах наборного поля. Для градуировки интегратора включите в цепь конденсатор ёмкостью  $C_x = 0,22$  мкФ.

2. Установите регулятором напряжение на выходе генератора 9 ... 11 В (по вольтметру V0).

3. Переведите на 2-3 с переключатель интегратора в верхнее положение («Сброс»), верните его в нижнее положение и сразу же переключите переключатель на выходе источника напряжения. Запишите величину скачка напряжения на выходе интегратора. Это нужно сделать сразу же после переключения, так как

даже при отсутствии тока на входе индикатора напряжение на его выходе медленно изменяется из-за утечки и помех.

4. Повторите этот опыт несколько раз и запишите напряжение на выходе источника и среднюю или наиболее часто повторяющуюся величину скачка напряжения на выходе интегратора. Определите ёмкость конденсатора, установленного внутри миниблока «Интегратор»:

$$U_0 = \dots B. \quad U_{\text{вых}} = \dots B. \quad C = 0,22 \frac{U_0}{U_{\text{вых}}} = \dots \text{ мкФ.}$$

5. Замените конденсатор  $C_x = 0,22 \text{ мкФ}$  на конденсатор другой емкости (0,1; 0,47; 1 мкФ или на комбинацию последовательно или параллельно соединенных конденсаторов), подберите такое напряжение на выходе генератора, при котором скачок напряжения на выходе интегратора составляет 9 - 11 В и повторите опыт, определив теперь емкость конденсатора (или комбинации конденсаторов), установленного вне миниблока «Интегратор»:

$$U_0 = \dots B. \quad U_{\text{вых}} = \dots B. \quad C_x = C \frac{U_{\text{вых}}}{U_0} = \dots \text{ мкФ.}$$

6. Сравните найденную емкость с номинальной емкостью, указанной на этикетке конденсатора или с емкостью, вычисленной по формулам для последовательно или параллельно соединенных конденсаторов.

### Контрольные вопросы

1. Физический смысл понятия «электроёмкость тела». Какие существуют способы увеличения электроёмкости проводника?

2. Что из себя представляет конденсатор? Чем обусловлена большая электроёмкость конденсатора?

3. Напишите формулу для определения емкости плоского конденсатора. От каких величин зависит электроёмкость плоского конденсатора?

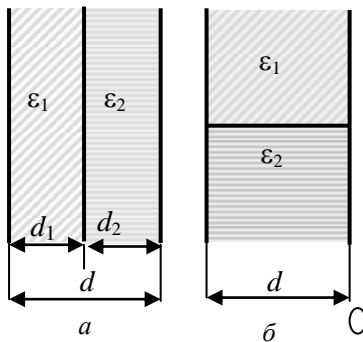


Рис. 3.2

4. Как определяются емкости батареи конденсаторов при параллельном и последовательном их соединении?
5. Почему на конденсаторах помимо номинального значения емкости указывается рабочее напряжение конденсатора?
6. Как рассчитать емкость конденсаторов, указанных на рис. 3.2, *а* и *б*?
7. Определить емкости батарей конденсаторов, указанных на рис. 3.3, *а* и *б*.



Рис. 3.3

**Литература:** 2. Гл. 11, §§ 92-95; 3. Гл. 16, §§ 2-3; 4. Гл.3, §§ 3-4.

#### Лабораторная работа № 4 ПРОЦЕССЫ ЗАРЯДА И РАЗРЯДА КОНДЕНСАТОРА, ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ВРЕМЕНИ

**Приборы и принадлежности:** блок генераторов напряжений с наборным полем, набор миниблоков с конденсаторами, набор проводов, компьютер.

**Цель работы:** исследование переходных процессов при замыкании и размыкании  $RC$ -цепи, определение постоянной времени  $RC$ -цепи.

#### Теоретическое введение

При замыкании и размыкании цепи, содержащей конденсатор, процесс установления напряжения в цепи происходит не сразу, а в течение некоторого промежутка времени.

Найдем характер изменения тока при замыкании цепи. В момент времени  $t = 0$  замкнем цепь переводом переключателя К в положение 1 (рис. 4.1).

Согласно второму правилу Кирхгофа

$$Ri + U = \varepsilon. \quad (1)$$

Здесь  $i$  – мгновенное значение силы тока,  $U$  –

мгновенное значение напряжения на конденсаторе

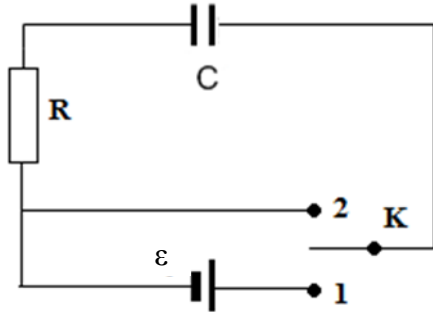


Рис. 4.1

$$U = \frac{q}{C}, \quad (2)$$

$$i = \frac{dq}{dt}. \quad (3)$$

Исключая  $q$  и  $i$ , получим

$$\frac{dU}{dt} + \frac{1}{RC}U - \frac{\varepsilon}{RC} = 0. \quad (4)$$

Введем новую переменную

$$u = U - \varepsilon. \quad (5)$$

Тогда

$$\frac{du}{dt} + \frac{1}{RC}u = 0. \quad (6)$$

Разделяя переменные и интегрируя, получим

$$u = A \exp\left(-\frac{t}{RC}\right). \quad (7)$$

Из начальных условий:

$$A = -\varepsilon.$$

Возвращаясь к прежней переменной  $U$ , находим окончательно для напряжения на конденсаторе выражение

$$U = \varepsilon(1 - \exp(-\frac{t}{RC})). \quad (8)$$

С течением времени напряжение на конденсаторе непрерывно увеличивается и асимптотически приближается к ЭДС источника.

Зависимость напряжения при замыкании цепи от времени представлена на рис. 4.2 (кривая 1).

Зависимость зарядного тока от времени имеет вид

$$i = \frac{-U + \varepsilon}{R} = \frac{\varepsilon}{R} \left( \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \right). \quad (9)$$

Сила тока имеет наибольшее значение в начальный момент времени и асимптотически приближается к нулю в процессе заряда.

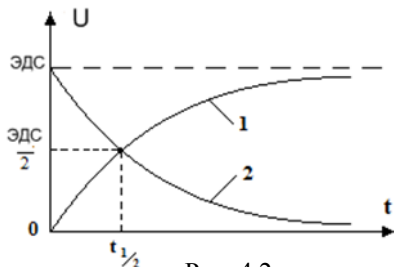


Рис. 4.2

Теперь найдем характер изменения напряжения при размыкании цепи. Пусть в цепь с конденсатором и сопротивлением включен источник тока с ЭДС равной  $\varepsilon$ . В момент времени  $t = 0$  отключим источник, не разрывая цепь переводом переключателя К в положение 2 (рис.4.1).

Так как ЭДС равен нулю, получим уравнение

$$\frac{dU}{dt} + \frac{1}{RC}U = 0. \quad (10)$$

Решая данное дифференциальное уравнение, получим закон изменения напряжения на конденсаторе при отключении источника:

$$U = \varepsilon \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \text{ или } U = \varepsilon \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (11)$$

где  $\tau = RC$  – постоянная времени (время релаксации). Время релаксации это время, в течение которого напряжение уменьшается в  $e$  раз. График зависимости напряжения от времени при отключении источника представлена на рис. 4.2 (кривая 2).

#### Задание

Вывести на дисплей виртуального осциллографа кривые изменения напряжения и тока заряда/разряда конденсатора. Определить по кривым постоянную времени цепи  $\tau$ . Заряд конденсатора осуществляется при воздействии на цепь импульса постоянного напряжения, разряд – при снятии импульса.

## Порядок выполнения эксперимента

1. Соберите на наборном поле цепь согласно схеме (рис. 4.3 и 4.4) и подсоедините к ее входным зажимам регулируемый источник напряжений специальной формы, настроенный на прямоугольные импульсы положительной полярности с параметрами

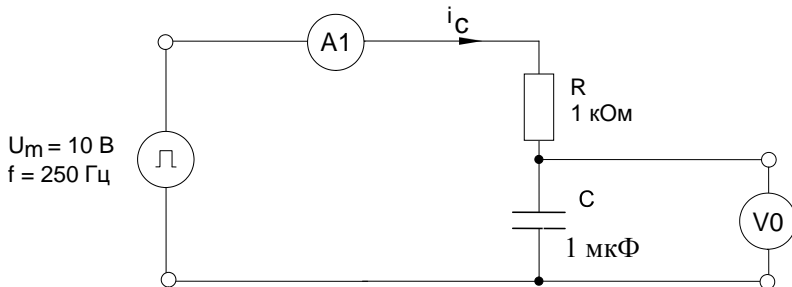


Рис. 4.3

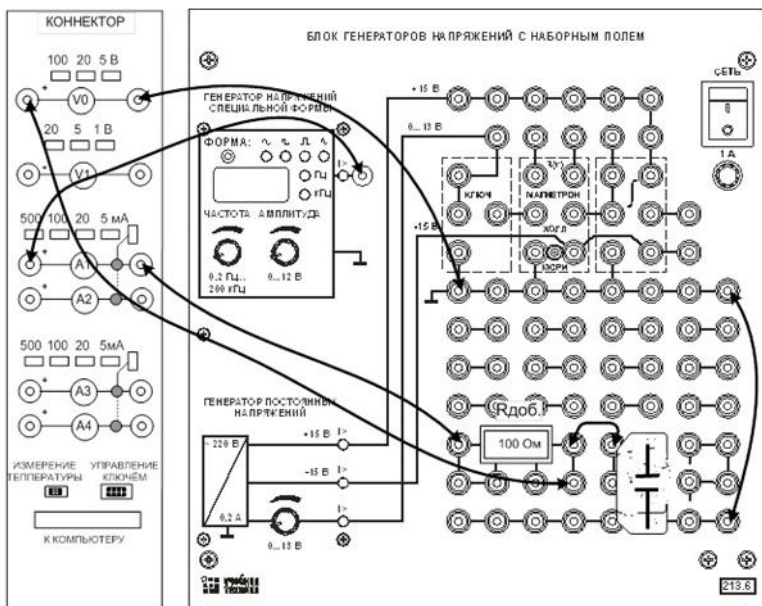


Рис. 4.4

точник напряжений специальной формы, настроенный на прямоугольные импульсы положительной полярности с параметрами

ми:  $U_m = 10 \text{ В}$ ,  $f = 200 \dots 250 \text{ Гц}$ . Измерительные приборы A1 и V0, в схеме – это соответствующие пары гнезд коннектора.

2. Приведите компьютер в рабочее состояние, «включите» виртуальный осциллограф и настройте его так, чтобы на экране было изображение процессов заряда и разряда конденсатора (рис. 4.5).

Параметры цепи:

$$R = 1 \text{ кОм}; C = 0,47 \text{ мкФ}; U_m = 10 \text{ В}; f = 250 \text{ Гц}.$$

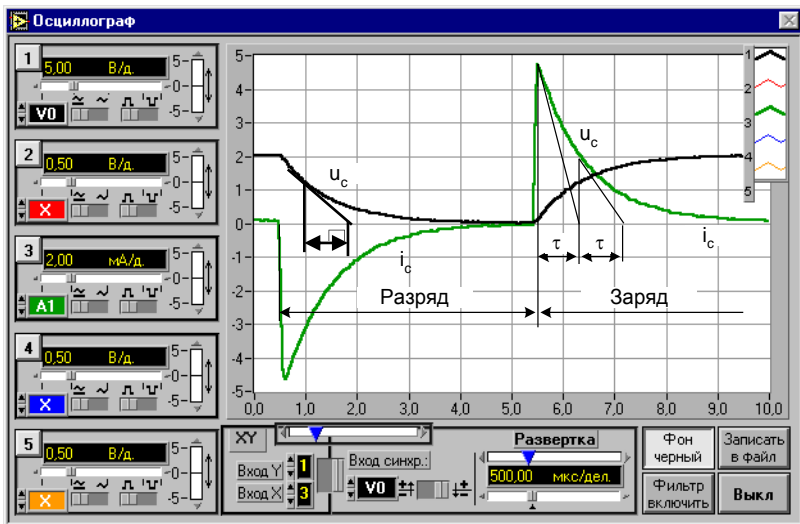


Рис. 4.5

## Обработка результатов измерений

### Первый способ

1. Перерисуйте осциллограммы тока и напряжения на миллиметровую бумагу или сделайте печатную копию дисплея виртуального осциллографа.

2. На полученных графиках нанесите обозначения кривых (ток, напряжение) и процессов (заряд, разряд). Проведите одну-две касательных к графику тока или напряжения и по величине подкасательной (рис. 4.5) определите постоянную времени  $\tau$ .

3. Рассчитайте постоянную времени по номинальным параметрам  $R$  и  $C$ , указанным на миниблоках, и сравните её с экспериментальным значением.

### **Второй способ**

Перерисуйте осциллограммы тока и напряжения на кальку или миллиметровую бумагу или сделайте печатную копию экрана. По длительности развертки осциллографа определите время  $t_{1/2}$ , в течение которого напряжение на обкладках конденсатора принимает значение, равное половине установившегося (рис. 4.2). Тогда из формулы (11) следует

$$\frac{1}{2} = \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right).$$

После логарифмирования выражения, получим формулу для вычисления постоянной времени  $\tau = RC$ :

$$\tau = \frac{t_{1/2}}{\ln 2}.$$

*Примечание.* Выбор способа обработки осциллограммы согласовать с преподавателем.

### **Контрольные вопросы**

1. Что называется постоянной релаксации?
2. Каков закон изменения напряжения на конденсаторе при включении и выключении источника?
3. Каков закон изменения тока в цепи при включении и выключении источника?

**Литература:** 3. Гл. 16, § 3; 5. Гл. 7, § 74.

## Лабораторная работа № 5 **ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКА**

**Приборы и принадлежности:** блок генераторов напряжений с наборным полем, миниблок «Удельное сопротивление», блок мультиметров, соединительные провода.

**Цель работы:** определение удельного сопротивления металла методом вольтметра и амперметра.

### Теоретическое введение

Металлы имеют электронную проводимость и являются проводниками первого рода. Формирование кристаллической решетки металла при его затвердевании сопровождается переходом части электронов из атомов металла в свободное состояние, в котором электрон не связан с определенным атомом и свободно перемещается по металлу, участвуя в тепловом движении. Свободные электроны образуют своеобразный «электронный газ». Именно наличие свободных электронов (электронов проводимости) и обуславливает хорошую электропроводность металлов.

В реальном кристалле направленное движение электронов под действием внешнего электрического поля затрудняется нарушением периодичности кристаллической решетки в результате теплового движения атомов, а также из-за наличия в решетке примесных атомов, вакансий, дислокаций и других дефектов. Взаимодействие движущихся электронов с деформированной решеткой приводит к их рассеянию. В этом состоит «противодействие» проводника пропусканию по нему электрического тока. Характеристикой этого свойства является скалярная физическая величина, называемая сопротивлением (электрическим сопротивлением) проводника.

В экспериментально установленном законе Ома

$$R = \frac{U}{I} \quad (1)$$

сопротивление  $R$  проводника представляет собой коэффициент пропорциональности между разностью потенциалов (напряжением)  $U$  на концах проводника и силой тока  $I$  в проводнике.

Значение сопротивления зависит от размеров и формы проводника, а также от его материала (вида металла или сплава). Сопротивление однородного цилиндрического проводника длиной  $l$  и площадью поперечного сечения  $S$  определяется выражением

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (2)$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление материала проводника, численно равное сопротивлению проводника единичной длины и единичного сечения из данного материала и измеряемое в Ом·м.

Площадь поперечного сечения цилиндрического проводника при известном его диаметре определяется выражением

$$S = \pi \frac{d^2}{4}. \quad (3)$$

При пропускании электрического тока по проводнику можно, используя закон Ома, определить электрическое сопротивление проводника, а также удельное сопротивление его материала. В случае однородного цилиндрического проводника удельное сопротивление с учетом выражений (1)–(3) находится как

$$\rho = \frac{\pi d^2 U}{4 l I}. \quad (4)$$

Следует иметь в виду, что прохождение электрического тока по проводнику сопровождается нагревом проводника (энергия упорядоченного движения электронов переходит во внутреннюю энергию проводника вследствие наличия у проводника электрического сопротивления). Удельное электрическое сопротивление металлов с ростом температуры увеличивается.

### Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка представляет собой электрическую цепь постоянного тока, состоящую из проводника с измеряемым сопротивлением  $R$ , вольтметра и амперметра и предусматривающую два варианта расположения амперметра в цепи (рис. 5.1, *a* и *б*). В первом случае (рис. 5.1, *a*) амперметр регистрирует ток, протекающий по проводнику, а показания вольтметра отображают суммарное падение напряжения на ам-

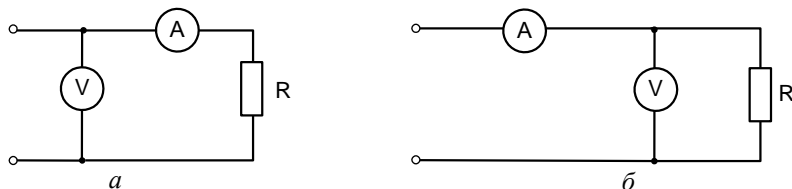


Рис. 5.1

перметре и проводнике. Во втором случае (рис. 5.1, б) амперметр регистрирует суммарный ток, протекающий через вольтметр и проводник, подключенные параллельно по отношению друг к другу, а показания вольтметра соответствуют падению напряжения на проводнике.

Проводник входит в состав миниблока «Удельное сопротивление» и представляет собой переменный резистор. Длину проводника можно изменять в интервале от 0 до 2,5 м вращением вала при помощи отвертки. Установленное значение длины определяется по шкале на лицевой панели миниблока, на которой также указан диаметр проводника.

В качестве вольтметра в работе используется мультиметр типа МУ62 (установлен с правой стороны блока мультиметров), в качестве амперметра – мультиметр типа МУ60 (установлен с левой стороны блока мультиметров). Указанный выбор обусловлен тем, что прибор МУ60 по сравнению с МУ62 имеет бóльшую перегрузочную способность по току. Каждый из мультиметров может также использоваться как омметр для прямого измерения электрического сопротивления.

Напряжение в электрической цепи создается генератором постоянного напряжения, входящим в состав блока генераторов напряжения с наборным полем, обеспечивающим регулируемое постоянное напряжение в диапазоне от 0 до 13 В.

Сборка электрической цепи производится на наборном поле, к гнездам которого подключены выходные зажимы генератора постоянного напряжения. Для удобства составления электрических цепей на наборном поле показаны сплошными линиями соединения гнезд между собой и с выходными зажимами генератора.

### **Порядок выполнения эксперимента**

1. Установите на миниблоке «Удельное сопротивление» заданную длину проводника.
2. Включите тумблером «Сеть» блок мультиметров и переведите один из мультиметров в режим омметра с пределом измерения 200 Ом.

3. Установите миниблок на наборную панель и измерьте сопротивление проводника мультиметром в режиме омметра.
4. Переведите мультиметр типа МУ60 в режим амперметра с пределом измерения 200 мА.
5. Переведите мультиметр типа МУ62 в режим вольтметра с пределом измерения 20 В.
6. Для измерения сопротивления методом вольтметра и амперметра соберите на наборной панели цепь, представленную на рис. 5.1, а. На рис. 5.2 сплошной линией показано соединение элементов цепи по схеме, приведенной на рис. 5.1, а; пунктирной линией – по схеме, приведенной на рис. 5.1, б.
7. Включите тумблером «Сеть» блок генераторов напряжений, предварительно установив ручку регулятора выходного напряжения в крайнее левое положение.

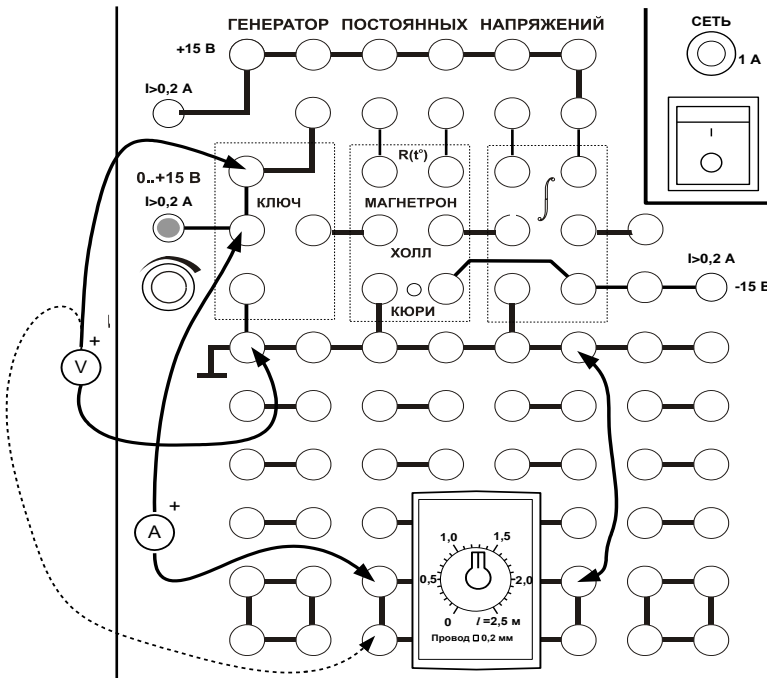


Рис. 5.2

8. Вращением ручки регулятора выходного напряжения установите последовательно 5 разных значений силы тока (**не более 200 мА**), измеряя напряжение при этих значениях силы тока.

9. Выключите тумблером «Сеть» блок генераторов напряжений.

10. Соберите на наборной панели цепь, представленную на рис. 5.1, б и повторите действия, изложенные в пунктах 7-9. Результаты всех измерений занесите в таблицу.

Электрическая схема	№ п/п	$I$ , мА	$U$ , В	$R$ , Ом	$\rho$ , Ом·м
рис. 5.1, а	1				
	2				
	...				
	5				
	–			$R_{\text{ср}} =$	$\rho_{\text{ср}} =$
рис. 5.2, б	1				
	2				
	...				
	5				
	–			$R_{\text{ср}} =$	$\rho_{\text{ср}} =$
Измерение мультиметром в режиме омметра				$R =$	$\rho =$
$l =$				$d =$	

11. Используя закон Ома, по результатам измерений силы тока и напряжения рассчитайте значение электрического сопротивления проводника. Рассчитайте по выражению (4) значение удельного электрического сопротивления материала проводника. Сравнив полученные значения со справочными данными, определите материал проводника.

12. Оцените погрешности измерений.

### Контрольные вопросы

1. Какой закон лежит в основе метода измерения сопротивления проводника – метода амперметра и вольтметра?
2. Какой проводимостью обладают металлы?

3. В чем причина наличия электрического сопротивления у металлов? При каких условиях возможна сверхпроводимость?

4. Как плотность электрического тока в проводнике связана со средней скоростью упорядоченного движения свободных электронов проводника?

5. От чего зависит электрическое сопротивление проводника?

6. Что характеризует удельное электрическое сопротивление материала проводника? Как и почему оно зависит от температуры?

7. Как связаны между собой удельное электрическое сопротивление и удельная электропроводность? В чем измеряется удельная электропроводность?

8. Запишите закон Ома для участка цепи в дифференциальной форме.

9. Объясните, в чем состоит методическая погрешность измерения сопротивления проводника методом вольтметра и амперметра при использовании каждой из электрических схем, представленных на рис. 5.1. Объясните причины различия результатов, полученных в обоих случаях. Сравните полученные результаты с результатом измерения сопротивления проводника мультиметром в режиме омметра.

**Литература:** 2. Гл. 12, §§ 98, 100; 3. Гл. 18, § 3; Гл. 19, § 1; Гл. 20, § 8; 4. Гл.5, § 4; Гл.11, § 1-2.

### Лабораторная работа № 6

#### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКА И ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЁННОЙ ЗОНЫ ПОЛУПРОВОДНИКА**

**Приборы и принадлежности:** миниблоки: «Электронный ключ», «Температурная зависимость», блок мультиметров, коннектор, персональный компьютер.

**Цель работы:** измерить зависимость сопротивлений проводника и полупроводника от температуры. Вычислить температурный коэффициент сопротивления проводника и ширину запрещённой зоны полупроводника.

## Теоретическое введение

По электрическим свойствам вещества разделяют на три класса: проводники, диэлектрики и полупроводники. Типичными проводниками являются металлы, у которых удельное электрическое сопротивление  $\rho < 10^{-6}$  Ом·м. Удельное электрическое сопротивление полупроводников обычно лежит в пределах от  $10^{-6}$  до  $10^{14}$  Ом·м. Материалы, величина  $\rho$  которых  $> 10^{14}$  Ом·м, относятся к диэлектрикам. Полупроводниками являются ряд элементов III–VI групп таблицы элементов Д.И. Менделеева (В, Ge, Si, As, Te и т.д.), а также большое количество химических соединений (GaAs, GaP, ZnS, SiC и др.). В зависимости от внешних условий (температура, давление) одно и то же вещество

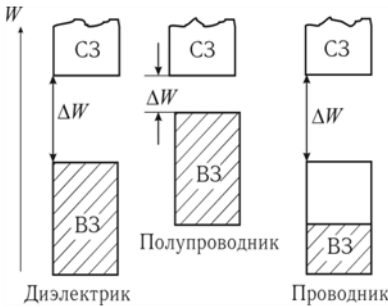


Рис. 6.1

может относиться к разным классам. Например, германий при температуре жидкого азота 77 К – диэлектрик, при комнатной температуре – полупроводник, а в жидком состоянии является проводником.

Квантовая теория твердого тела дает более обоснованную классификацию веществ. Согласно этой теории, электроны в атоме могут иметь только определенные значения энергии, которые называют энергетическими уровнями. Именно эти уровни при объединении отдельных атомов в кристалл образуют разрешённые энергетические зоны. Промежуток, разделяющий такие зоны, называют запрещённой зоной. Энергетическая зона считается заполненной, если все уровни зоны заняты электронами. При этом, согласно принципу Паули, на одном энергетическом уровне может находиться не более двух электронов, имеющих противоположно направленные спины. Зона считается свободной, если все уровни этой зоны не заняты. На рис. 6.1 схематично изображены энергетические зоны диэлектриков, полупроводников и проводников. Здесь буквами обозначены: ВЗ – валентная, СЗ – свободная, ΔW – ширина запрещённой зоны. Штриховкой отмечена заполненная часть зоны (при абсолютной температуре  $T = 0$  К.

Именно эти уровни при объединении отдельных атомов в кристалл образуют разрешённые энергетические зоны. Промежуток, разделяющий такие зоны, называют запрещённой зоной. Энергетическая зона считается заполненной, если все уровни зоны заняты электронами. При этом, согласно принципу Паули, на одном энергетическом уровне может находиться не более двух электронов, имеющих противоположно направленные спины. Зона считается свободной, если все уровни этой зоны не заняты. На рис. 6.1 схематично изображены энергетические зоны диэлектриков, полупроводников и проводников. Здесь буквами обозначены: ВЗ – валентная, СЗ – свободная, ΔW – ширина запрещённой зоны. Штриховкой отмечена заполненная часть зоны (при абсолютной температуре  $T = 0$  К.

Если в веществе валентные электроны, ответственные за все электрические свойства, образуют полностью заполненную зону (её называют валентной зоной) так, что последующая разрешённая зона свободна (её называют зоной проводимости), то электропроводность такого вещества равна нулю, и оно является диэлектриком. Действительно, движение электронов под действием внешнего электрического поля (электрический ток) предполагает увеличение энергии электронов, т.е. переход их на более высокий незаполненный энергетический уровень. В случае же полностью заполненной валентной зоны таких уровней нет, значит, в веществе с такой зонной структурой электрон не может ускоряться внешним электрическим полем.

Для того чтобы перевести электроны из валентной зоны в зону проводимости, им следует сообщить энергию, не меньшую, чем ширина запрещённой зоны  $\Delta W$ . Часть электронов приобретает эту энергию при облучении вещества светом или за счёт теплового движения атомов. Поэтому при обычных температурах ( $T \approx 300$  К) в зоне проводимости есть некоторое количество электронов. В зависимости от их концентрации вещество может быть либо диэлектриком, либо полупроводником, причём различие между этими классами определяется значениями  $\Delta W$  и температуры  $T$ . Для полупроводников при комнатной температуре ширина запрещённой зоны  $\Delta W$  составляет 0,02 – 2 эВ, а для диэлектриков – больше 2 эВ.

Температурная зависимость проводимости полупроводников определяется изменением концентрации носителей тока – электронов, перешедших в зону проводимости. При увеличении температуры их количество экспоненциально возрастает, поэтому сопротивление  $R$  чистых полупроводников уменьшается с ростом температуры  $T$  по закону

$$R = A \exp\left(\frac{\Delta W}{2kT}\right), \quad (1)$$

где  $T$  – абсолютная температура в К;  $A$  – коэффициент, почти не зависящий от температуры;  $\Delta W$  – ширина запрещённой зоны;  $k=1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана.

Проводники имеют другую зонную структуру. Валентные электроны частично заполняют зону (рис. 6.1), при этом элек-

троны могут свободно перемещаться под действием внешнего электрического поля. Валентная зона является в данном случае зоной проводимости. В проводнике концентрация свободных электронов не зависит от температуры – в этом основное отличие проводника от полупроводника и диэлектрика. Для проводников зависимость сопротивления от температуры значительно слабее, чем для диэлектриков. Она определяется рассеянием энергии электронов при взаимодействии с дефектами и фононами (квантами упругих волн) кристаллической решетки. С ростом температуры увеличивается число фононов, что ведет к снижению длины свободного пробега электронов проводимости в металле. При этом электрическое сопротивление  $R$  проводников увеличивается по линейному закону

$$R = R_0(1 + \alpha_t t), \quad (2)$$

где  $R_0$  – сопротивление проводника при  $0^\circ\text{C}$ ,  $\alpha_t$  – температурный коэффициент сопротивления,  $t$  – температура в градусах Цельсия.

### Описание экспериментальной установки и порядок выполнения эксперимента

Установите миниблоки «Температурная зависимость» и «Электронный ключ» на наборное поле, как показано на рис. 6.2 и выполните показанные на рисунке соединения.

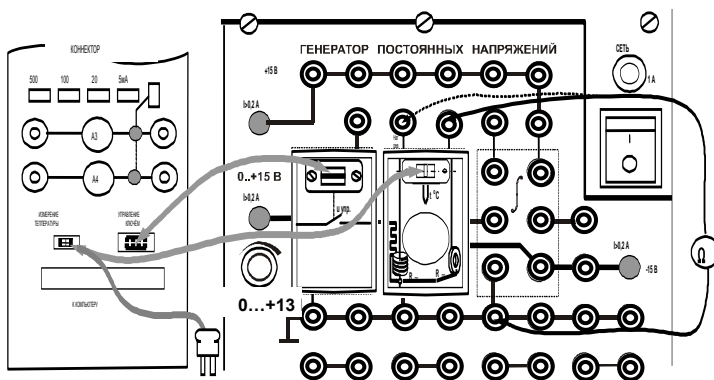


Рис. 6.2

Включите компьютер и вызовите на дисплей виртуальный прибор: «Термометр/термостат». Запишите в табл. 1 значение температуры и сопротивления проводника и полупроводника в исходном состоянии (без подогрева). Параллельно компьютеру для измерения температуры можно подключить также мультиметр специальной вилкой, имеющейся на соединительном кабеле.

Включите термостат, введите в окно «Заданное значение температуры» какое-нибудь значение, превышающее температуру окружающей среды, включите блок генераторов напряжений и выведите регулятор напряжения в крайнее правое положение (максимальный ток нагрева). При этом на термостате включится надпись «Нагрев», а в окне миниблока загорится сигнальная лампочка.

Следите за изменением температуры по красному столбику термометра. Как только температура превысит заданное значение на  $1..1,5^{\circ}\text{C}$ , нагрев выключится. После снижения температуры до значения на  $1..1,5^{\circ}\text{C}$  меньше заданного нагрев включится снова.

При отключенном нагреве измерьте сопротивления проводника ( $R_{\text{пр}}$ ) и полупроводника ( $R_{\text{пт}}$ ) и запишите их значения в табл. 1. (При включённом нагреве в участок цепи, на котором измеряется сопротивление, входит отрезок провода и контактное соединение, обтекаемые током нагрева, поэтому показание прибора будет неточным).

Постепенно увеличивайте температуру и, когда она достигнет заданную, измеряйте сопротивления проводника и полупроводника и записывайте их значения в табл. 1.

Таблица 1

$t, ^{\circ}\text{C}$					
$R_{\text{пр}}, \text{Ом}$					
$R_{\text{пт}}, \text{Ом}$					

*Предупреждение:*

1. Для надёжной длительной работы миниблока не нагревайте его выше  $90^{\circ}\text{C}$ .
2. Ток нагрева в крайнем правом положении регулятора несколько превышает номинальное значение тока генератора  $200 \text{ mA}$ ,

поэтому возможно отключение генератора защитой, особенно при высокой температуре окружающей среды. В этом случае нужно уменьшить ток нагрева.

Выберите масштабы, нарисуйте координатную сетку и постройте графики  $R_{\text{пр}}(t)$  и  $R_{\text{ин}}(t)$ .

Определите температурный коэффициент сопротивления проводника. Для этого аппроксимируйте опытную зависимость  $R_{\text{пр}}(t)$  прямой линией:  $R(t) = R_0(1 + \alpha t)$ , определите из графика значение сопротивления  $R_0$  при  $t=0$  и коэффициент наклона прямой  $\Delta R/\Delta t$ . Тогда

$$\alpha = \frac{\Delta R}{R_0 \Delta t} = \dots 1/\text{град.} \quad (3)$$

Определите ширину запрещённой зоны полупроводника из уравнения (1). Это уравнение после логарифмирования преобразуется в уравнение прямой в координатных осях  $\ln R$  от  $\left(\frac{1}{T}\right)$ :

$$\ln R = \ln A + \frac{\Delta W}{2kT}. \quad (4)$$

Для определения  $\Delta W$  прологарифмируйте опытные значения  $R_{\text{ин}}$ , вычислите соответствующие им значения  $1/T$  и сведите результаты вычислений в табл. 2.

Таблица 2

$t, ^\circ\text{C}$						
$\ln R_{\text{ин}}$						
$1/T, \text{K}^{-1}$						

По данным табл. 2 постройте график  $R(1/T)$ . График аппроксимируйте прямой линией, определите её коэффициент наклона:

$$K = \frac{\Delta(\ln R)}{\Delta(1/T)} = \frac{\Delta W}{2k}.$$

Тогда ширина запрещённой зоны определяется по формуле:

$$\Delta W = 2kK.$$

Проведите оценку ошибки измерения температурного коэффициента сопротивления заданного вещества и ширины запрещённой зоны.

### Контрольные вопросы

1. В чем состоит различие температурного коэффициента сопротивления металлов и полупроводников?

2. В чем состоит отличие электрических свойств полупроводников и металлов?

3. Запишите выражение, показывающее зависимость сопротивления металлов от температуры.

4. Запишите выражение для температурного коэффициента сопротивления

металла и укажите его размерность в системе единиц СИ.

5. Как определить температурный коэффициент сопротивления системы, состоящей из полупроводника и металла? Каков вид температурной зависимости такой системы?

**Литература:** 3. Гл. 42. §§ 1-5.

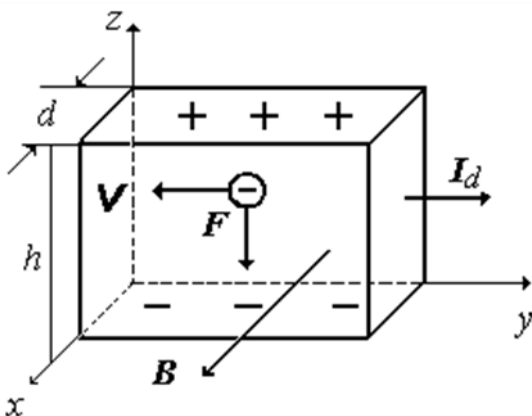


Рис. 7.1

### Лабораторная работа № 7

#### ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТА ХОЛЛА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

**Приборы и принадлежности:** миниблок «датчик Холла», блок мультиметров, наборная панель, генератор постоянного напряжения, соединительные провода.

**Цель работы:** снять зависимость ЭДС Холла от магнитной индукции, определить постоянную Холла и концентрацию носителей заряда.

#### Теоретическое введение

Если поместить полупроводник, через который протекает электрический ток в поперечное магнитное поле (рис. 7.1), то в нём возникает поперечная разность потенциалов (эффект Холла).

Эффект Холла обусловлен силой Лоренца  $F_{\text{л}} = e [v \times B]$ , которая действует со стороны магнитного поля на электроны, несущие заряд  $e$  и дрейфующие в электрическом поле со скоростью  $v$  (средняя скорость упорядоченного движения). В нашем случае сила Лоренца направлена вдоль отрицательного направления оси  $Z$  и равна по модулю  $\vec{F}_{\text{л}} = q[\vec{v} \times \vec{B}]$ .

Под действием силы Лоренца электроны отклоняются к нижней грани пластины, заряжая ее отрицательно. На верхней грани накапливаются положительные заряды. Это приводит к возникновению электрического поля  $E$ , направленного сверху вниз и к появлению разности потенциалов

$$U = Eh, \quad (1)$$

где  $h$  – высота пластины.

Поле  $E$  действует на электроны силой  $F_{\text{эл}} = eE$ , направленной против силы Лоренца. В установившемся режиме сила  $F_{\text{эл}}$  уравнивает силу Лоренца, т.е.

$$eE = evB, \quad (2)$$

и дальнейшее накопление зарядов на верхней и нижней гранях пластины прекращается.

Выразим силу тока  $I_d$  через плотность тока  $j = nev$  и сечение полупроводника  $S = hd$ :

$$I_d = nevhd, \quad (3)$$

где  $n$  – концентрация свободных электронов.

Исключая из соотношений (1), (2), (3) величины  $v$  и  $h$ , приходим к формуле:

$$U = R \frac{I_d B}{d}, \quad (4)$$

в которой постоянная  $R = 1/ne$  называется постоянной Холла.

### Порядок выполнения работы

Соберите электрическую цепь по схеме рис. 7.2, сначала включив амперметр для измерения тока датчика Холла (как показано на рисунке пунктиром).

Выведите регулятор генератора постоянного напряжения на ноль (до упора влево), включите блок генераторов напряжений и запишите значение тока в датчике Холла:  $I_d = \dots$  мА.

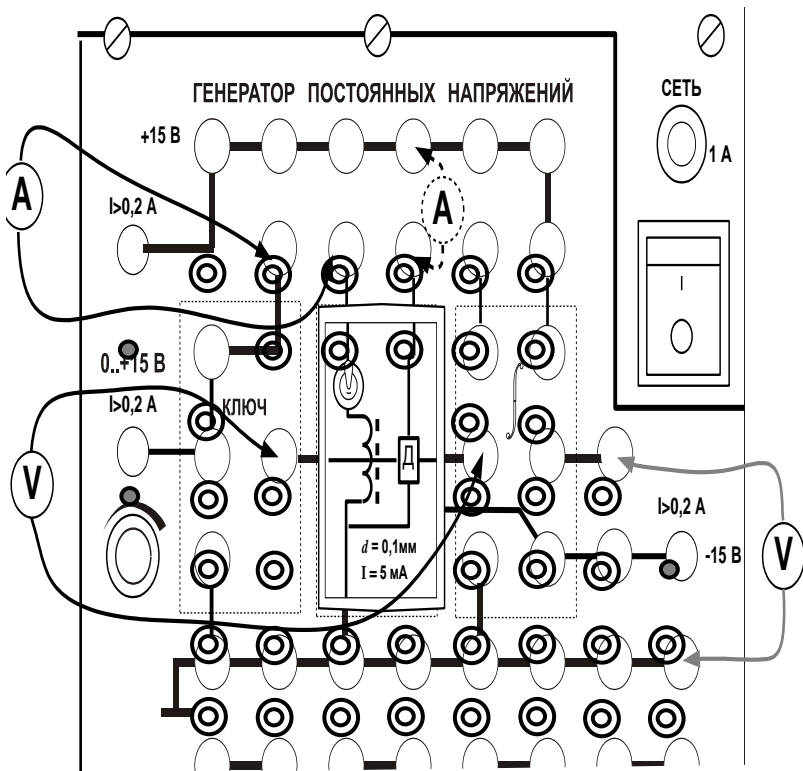


Рис. 7.2

Переключите амперметр для измерения тока в катушке (как показано на рисунке сплошной линией), а гнезда, к которым был подключён амперметр, соедините перемычкой.

Установите в катушке первое значение тока 20 мА и запишите в таблицу значение ЭДС Холла  $U_1$ . Поменяйте направление тока в катушке переключателем на миниблоке и снова запишите в таблицу значение ЭДС Холла  $U_2$ .

Увеличивайте постепенно ток в катушке с шагом 20 мА до 200 мА, записывайте значения ЭДС при прямом и обратном токе в таблице.

$I, \text{мА}$	$U_1, \text{мВ}$	$U_2, \text{мВ}$	$U, \text{мВ}$	$B, \text{мТл}$
20				
40				
....				
200				

Рассчитайте среднее значение ЭДС ( $U$ ) Холла при прямом и обратном токе, а также магнитную индукцию в зазоре сердечника, на который намотана катушка:

$$B = \frac{\mu_0 I w}{l}, \quad (5)$$

где  $I$  – ток в катушке;  $w = 1200$  – количество витков;  $l = 1,7$  мм – величина зазора.

Постройте график  $U=U(B)$ , аппроксимируйте его прямой линией и определите коэффициент наклона:

$$K = \frac{\Delta U}{\Delta B}. \quad (6)$$

Определите постоянную Холла и концентрацию носителей заряда в полупроводнике:

$$R = \frac{Kd}{I_d}; \quad (7)$$

$$n \cong \frac{1}{eR}, \quad (8)$$

где  $d = 0,1$  мм – толщина пластины полупроводника;  $e = 1,6^{-19}$  Кл – элементарный заряд.

### Контрольные вопросы

1. В чем сущность эффекта Холла?
2. Какой физический смысл имеет постоянная Холла?
3. Какие электрофизические свойства полупроводников можно исследовать с помощью эффекта Холла?
4. Почему эффект Холла не обнаруживается у проводников?
5. Как по эффекту Холла определить тип проводимости у примесных полупроводников?
6. Какие применения может найти эффект Холла?

**Литература:** 2. Гл. 14, § 117; 3. Гл. 21, § 2; Гл. 23, § 1-2; 4. Гл.6, § 5; Гл.11, § 3.

Лабораторная работа № 8  
ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА  
МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

**Приборы и принадлежности:** блок генераторов напряжений с наборным полем, миниблок «Магнетрон», блок мультиметров.

**Цель работы:** определить удельный заряд электрона методом магнетрона.

**Теоретическое введение**

Удельным зарядом электрона называется отношение заряда  $e$  электрона к его массе  $m$ . Экспериментальные методы определения  $e/m$  основаны на действии электрического и магнитного полей на электроны, движущиеся в этих полях с определенной скоростью.

В данной работе для определения удельного заряда электрона  $e/m$  используется цилиндрический магнетрон. Магнетроном называется двухэлектродная электронная лампа (диод), в которой электроны, летящие от катода к аноду, наряду с электрическим полем, подвергаются действию внешнего магнитного поля. Магнитное поле, направленное вдоль вертикальной оси лампы, создается соленоидом.

На электрон в электрическом поле, создаваемым между катодом и анодом, действует сила

$$\vec{F} = e\vec{E} \quad (1)$$

Здесь  $\vec{E}$  – напряженность поля между катодом и анодом (поле цилиндрического конденсатора):

$$E = \frac{C}{r}, \quad (2)$$

где  $r$  – расстояние от оси цилиндра.

Разность потенциалов между катодом радиуса  $r_0$  и анодом радиуса  $r_a$  равна

$$U_a = \int_{r_0}^{r_a} E dr = C \int_{r_0}^{r_a} \frac{dr}{r} = C \ln \frac{r_a}{r_0} \quad (3)$$

Отсюда находим постоянную  $C$ :

$$C = \frac{U_a}{\ln \frac{r_a}{r_0}} \quad (4)$$

Таким образом, уравнение движения электрона в электрическом поле, создаваемом между катодом и анодом, можно представить в виде:

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = \frac{e U_a}{\ln(r_a/r_0)} \frac{1}{r}. \quad (5)$$

Значение времени пролета электрона от катода к аноду дает решение уравнения (5):

$$t = \sqrt{\frac{r_a^2}{3U_a} \frac{m}{e} \ln \frac{r_a}{r_0}}. \quad (6)$$

При пропускании через соленоид электрического тока  $I_C$  возникает магнитное поле, которое в средней части соленоида близко к однородному. Индукцию магнитного поля соленоида можно рассчитать по формуле

$$B = \frac{\mu_0 n I_C}{l} = \mu_0 n I_C. \quad (7)$$

где  $n$  – количество витков на единицу длины соленоида,  $I_C$  – ток в соленоиде.

На заряд  $q$ , движущийся в магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$  со скоростью  $\vec{v}$ , действует сила Лоренца, перпендикулярная векторам  $\vec{B}$  и  $\vec{v}$ , и равная

$$\vec{F}_L = q[\vec{v} \times \vec{B}]. \quad (8)$$

Величина силы Лоренца зависит от угла между направлением скорости и вектором индукции магнитного поля:

$$F_L = qvB \sin(\vec{v}\vec{B}). \quad (9)$$

Так как электроны движутся радиально, а магнитное поле соленоида направлено по оси лампы, то угол между  $\vec{v}$  и

$\vec{B}$  равен  $90^\circ$  и сила Лоренца, действующая на движущийся электрон, перпендикулярна  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ . Эта сила сообщает частице центростремительное ускорение и частица будет двигаться по окружности. Радиус этой окружности можно найти, записав второй закон Ньютона:

$$\frac{mv^2}{R} = qvB, \quad (10)$$

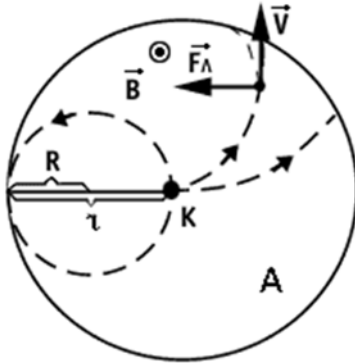


Рис. 8.1

$$R = mv/qB. \quad (11)$$

Время, за которое частица совершает один полный оборот (период вращения), равен:

$$T = \frac{2\pi R}{v} = 2\pi m/qB \quad (12)$$

С увеличением индукции магнитного поля соленоида (силы тока в соленоиде) радиус траектории уменьшается (см. формулу (11)).

Траектории движения электронов при различных значениях индукции магнитного поля показаны на рис. 8.1. Здесь представлены траектории трех электронов, вылетающих с поверхности катода с различными скоростями.

При малых полях все электроны попадают на анод, поэтому анодный ток остается неизменным при увеличении магнитного поля. При некотором поле уже не все электроны попадают на анод, поэтому анодный ток уменьшается. Когда ни один электрон не попадает на анод, ток в анодной части цепи прекращается.

Рассмотрим идеальный случай, когда скорости всех вылетевших с поверхности катода электронов равны. При некотором значении тока в соленоиде радиус окружности  $R$  становится равным половине расстояния между катодом и анодом  $r_a/2$ . Такой режим работы лампы называется критическим. При этом по соленоиду течет критический ток  $I_{кр}$ , которому соответствует

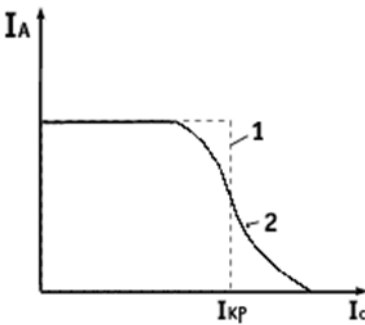


Рис. 8.2

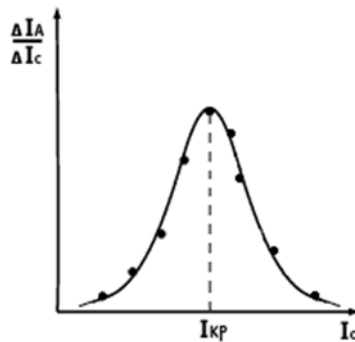


Рис. 8.3

критическое поле  $B = B_{кр}$ . При  $B > B_{кр}$  электроны перестают попадать на анод и анодный ток уменьшается скачком (кривая I на рис. 8.2).

При выполнении условия  $B = B_{кр}$  время пролета электрона от катода к аноду, определяемое формулой (6), равно полупериоду вращения электрона по окружности. Период определяется по формуле (12). Таким образом:

$$\sqrt{\frac{r_a^2}{3U_a} \frac{m}{e}} \ln \frac{r_a}{r_0} = \frac{1}{2} \frac{2\pi m}{2eB_{кр}}. \quad (13)$$

Отсюда находим удельный заряд электрона:

$$\frac{e}{m} = \frac{3\pi^2 U_a}{B_{кр}^2 r_a^2 \ln \frac{r_a}{r_0}} = \frac{3\pi^2 U_a}{\mu_0^2 n^2 I_{кр}^2 r_a^2 \ln \frac{r_a}{r_0}}. \quad (14)$$

Эту формулу можно представить в другом виде:

$$\frac{e}{m} = k \frac{U_a}{n^2 I_{кр}^2}. \quad (15)$$

где  $k$  – постоянная установки, зависящая от конструкции лампы. Значение постоянной  $k$  и числа витков  $n$  соленоида на единицу длины указаны в паспорте установки.

В реальном магнетроне, вследствие некоторого разброса скоростей электронов и нарушения соосности катода и магнитного поля, анодный ток уменьшается не скачком (кривая 2 на рис. 8.2). Значение силы тока соленоида в точке перегиба кривой и будет критическим током.

Для нахождения  $I_{кр}$  строится график зависимости производной  $\frac{dI_a}{dI_c}$  (точнее  $\frac{\Delta I_a}{\Delta I_c}$ ) от тока в соленоиде  $I_c$  и по положению максимума определяется критический ток соленоида (рис. 8.3).

### Описание экспериментальной установки

Диод представляет собой высоковакуумный баллон Б с двумя впаянными в него электродами – анодом А и катодом К. Анод имеет форму цилиндра радиуса  $r_a$ . Катод представляет собой полый цилиндр радиуса  $r_0$ , по оси которого расположена вольфрамовая нить – нить накала.

Раскаленный катод испускает термоэлектроны, образующие вокруг катода электронное облако. При создании между анодом и катодом разности потенциалов  $U_a$  (анодное напряжение), электроны начинают перемещаться от катода к аноду вдоль радиу-

сов, и во внешней цепи лампы возникает анодный ток  $I_a$ , величина которого зависит от приложенного анодного напряжения. Чем больше анодное напряжение, тем больше электронов в единицу времени достигают анода, следовательно, тем больше анодный ток. При некотором значении анодного напряжения все электроны, вырванные с поверхности металла в результате термоэлектронной эмиссии, достигают анода и при дальнейшем увеличении  $U_a$  ток не увеличивается, т.е. достигает насыщения.

Соленоид состоит из большого числа витков изолированной медной проволоки, намотанной на каркас. Магнетрон размещен так, что лампа находится в центре соленоида, где поле однородно.

*Параметры магнетрона:* число витков катушки  $w = 2800$ ; высота катушки (внешнего магнитопровода)  $l = 36$  мм; радиус цилиндрического анода  $r_a = 5$  мм.

### Порядок выполнения эксперимента

Соберите цепь, как показано на рис. 8.4.

Для измерения тока в катушке используйте левый мультиметр А1, установив на нём предел измерения 200 мА, а для измерения анодного тока – правый мультиметр А2, установив предел измерения 5 мА.

Включите блок генераторов напряжений и регулятором постоянного напряжения установите первое значение тока в катушке 100 мА. Значения тока в катушке и анодного тока запишите в таблице. Увеличивая ток в катушке до максимально возможного значения, снимите зависимость  $I_a(I_k)$ .

$I_k$ , мА	100	110	120	130	140	150	160	170	
$I_a$ , мА									

По табличным значениям постройте график зависимости анодного тока от тока в катушке.

Определите по графику или по таблице значение критического тока ( $I_{кр}$ ) в катушке, при котором анодный ток убывает наиболее быстро (точка перегиба графика).

$$I_{кр} = \dots \text{ А.}$$

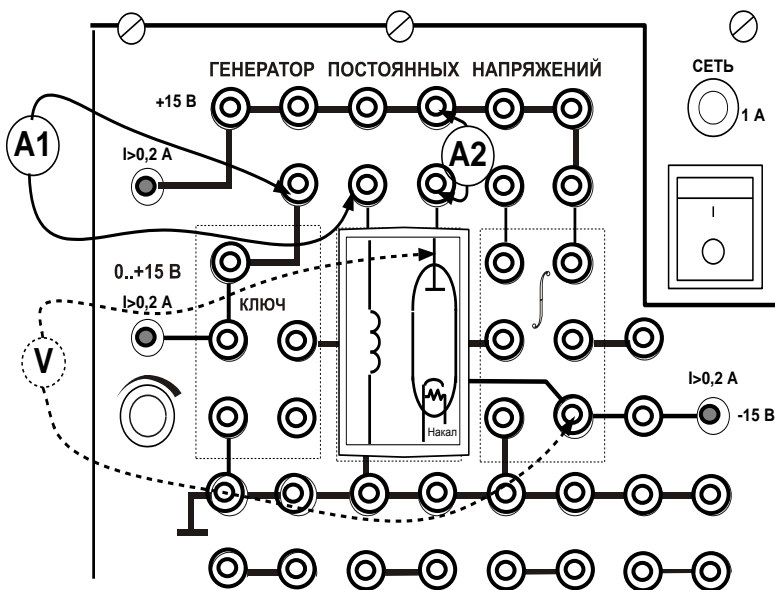


Рис.8.4

Установите регулятором напряжения критический ток в катушке, измерьте и запишите значение напряжения между анодом и катодом лампы. Для этого необходимо отключить один из мультиметров, вставить в наборное поле вместо него перемычку, переключить мультиметр в режим измерения постоянного напряжения и подсоединить его вход «СОМ» к катоду лампы (т.е. к гнезду «-15 В» наборного поля), а вход «V» – непосредственно к аноду лампы (но не к гнезду «+15 В», так как в анодной цепи лампы установлено сопротивление для ограничения тока).

Напряжение между анодом и катодом, измеренное при критическом токе:

$$U = \dots \text{ В.}$$

Определите критическое значение магнитной индукции и удельный заряд электрона по приближённым формулам:

$$B_{\text{кр}} \cong \mu_0 \frac{I_{\text{кр}} w}{2l}, \quad \frac{e}{m} \cong \frac{8U}{(B_{\text{кр}} r)^2},$$

где  $w$  – число витков катушки;  $2$  – коэффициент, учитывающий экранирующее действие цилиндрического анода лампы, которое ослабляет поле примерно в 2 раза;  $l$  – высота катушки (внешнего магнитопровода);  $U$  – напряжение между анодом и катодом при критическом токе;  $r$  – радиус цилиндрического анода.

### Контрольные вопросы

1. Объясните принцип работы магнетрона.
2. Чем вызвано плавное изменение анодного тока от тока соленоида?
3. Сравните полученное значение удельного заряда электрона с табличным и перечислите основные факторы, влияющие на точность измерений.

**Литература:** 2. Гл. 14, §§ 109, 114, 115; 3. Гл. 23, § 1-3; 4. Гл.6, § 6; Гл.10, § 1-3.

### Лабораторная работа № 9 ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОСИ КОЛЬЦЕВЫХ КАТУШЕК

**Приборы и принадлежности:** блок генераторов напряжений с наборным полем, миниблок «Кольцевые катушки», миниблок «Тесламетр», блок мультиметров.

**Цель работы:** измерение распределения индукции магнитного поля кольцевой катушки вдоль ее оси, а также двух катушек, включенных последовательно.

### Теоретическое введение

Для расчета индукции магнитного поля тонкой катушки используется закон Био – Савара – Лапласа и принцип суперпозиции магнитных полей.

Первоначально находят индукцию поля  $\vec{B}$  в произвольной точке  $A$  оси  $OX$  (рис. 9.1), создаваемого одним витком радиуса  $R$ , по которому течет ток  $I$ . Согласно закону Био – Савара – Лап-

лаسا индукция  $\vec{dB}$ , создаваемая в точке  $A$  элементом тока кольца  $\vec{dl}$ , равна:

$$\vec{dB} = \frac{\mu_0 I |\vec{dl}\vec{r}|}{4\pi r^3}. \quad (1)$$

Модуль этого вектора

$$dB = \frac{\mu_0 I dl \sin \alpha}{4\pi r^2},$$

где  $\alpha$  – угол между векторами  $\vec{dl}$  и  $\vec{r}$ . Поскольку в данной задаче для любой точки кольца  $\vec{dl} \perp \vec{r}$ , то  $\sin \alpha = 1$ , а модуль  $dB$  равен:

$$dB = \frac{\mu_0 I dl}{4\pi r^2}. \quad (2)$$

Для нахождения индукции поля  $\vec{B}$ , создаваемого всем кольцом в точке  $A$ , нужно проинтегрировать с учетом сказанного уравнение (1) по всему кольцу:

$$\vec{B} = \int \vec{dB}.$$

Для простоты интегрирования вектор  $\vec{dB}$ , который перпендикулярен векторам  $\vec{dl}$  и  $\vec{r}$ , раскладывается на составляющие  $\vec{dB}_x$  и  $\vec{dB}_y$  (рис. 9.1).

$$\vec{dB} = \vec{dB}_x + \vec{dB}_y.$$

Или  $dB = \sqrt{dB_x^2 + dB_y^2}$ , где  $dB_x = dB \sin \beta$ , а  $dB_y = dB \cos \beta$ . Интегрируя по всему кольцу, находят  $B_x = \int dB_x$  и  $B_y = \int dB_y$ , а модуль вектора  $B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2}$ . Однако можно догадаться, что интегри-

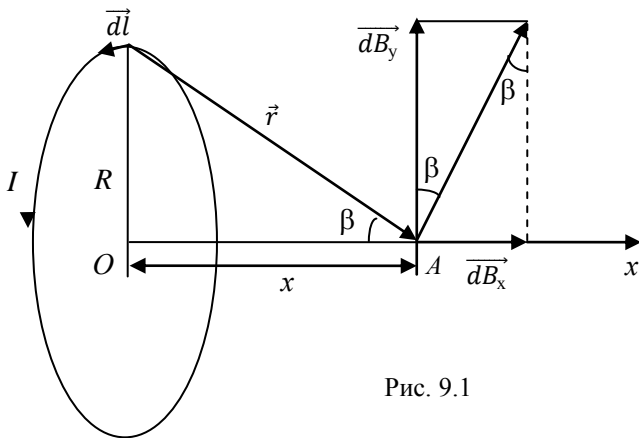


Рис. 9.1

рование  $dB_y$  дает в результате ноль, так как в силу симметрии задачи всегда найдутся элементы тока  $\vec{dl}$ , лежащие на одном диаметре и дающие компоненты  $dB_y$ , равные по величине, но противоположно направленные, что при суммировании по всему проводнику и дает ноль. Тогда  $B = B_x = \int dB_x$ , а результирующий вектор  $\vec{B}$  направлен вдоль оси  $OX$ .

Из рис. 9.1 и формулы (2) находим  $dB_x$ :

$$dB_x = dB \sin \beta = dB \frac{R}{r} = dB \frac{R}{(R^2+x^2)^{1/2}} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{R dl}{(R^2+x^2)^{3/2}}.$$

Интегрируя по всему кольцу, получим  $B$ :

$$B = B_x = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{R}{(R^2+x^2)^{3/2}} \int_0^{2\pi R} dl = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{R 2\pi R}{(R^2+x^2)^{3/2}} = \frac{\mu_0 I}{2} \frac{R^2}{(R^2+x^2)^{3/2}}.$$

Если принять, что используемые в работе катушки тонкие (длина катушки  $l \ll R$ ) и содержат каждая по  $N$  витков, то для индукции поля на оси одной катушки можно написать:

$$B_{\text{катушки}} = \frac{\mu_0 N I}{2} \frac{R^2}{(R^2+x^2)^{3/2}}. \quad (3)$$

Максимальное значение индукции, как это следует из (3), достигается в центре катушки при  $x = 0$ .

### Описание экспериментальной установки

На стенд генераторов постоянных напряжений (рис. 9.2) устанавливаются миниблоки «Кольцевые катушки» и «Тесламетр». Подводят к катушкам питание от регулируемого источника постоянного напряжения 0...15 В через амперметр. Выходной сигнал «Тесламетра» измеряется вольтметром. Схема соединений показана на рис. 9.2.

Миниблок «Кольцевые катушки» состоит из двух одинаковых кольцевых катушек. Одна из катушек неподвижна, а другая может перемещаться с помощью специального штока. Минимальное расстояние между центрами катушек 5 мм. На лицевой поверхности миниблока нанесена шкала, по которой можно определить текущее расстояние между катушками, указаны одноименные зажимы, число витков и средний диаметр катушек, а также показано расположение выводов. Максимальный допустимый ток катушек, вне зависимости от числа используемых в эксперименте (одна или две), составляет 200 мА (0,2 А).

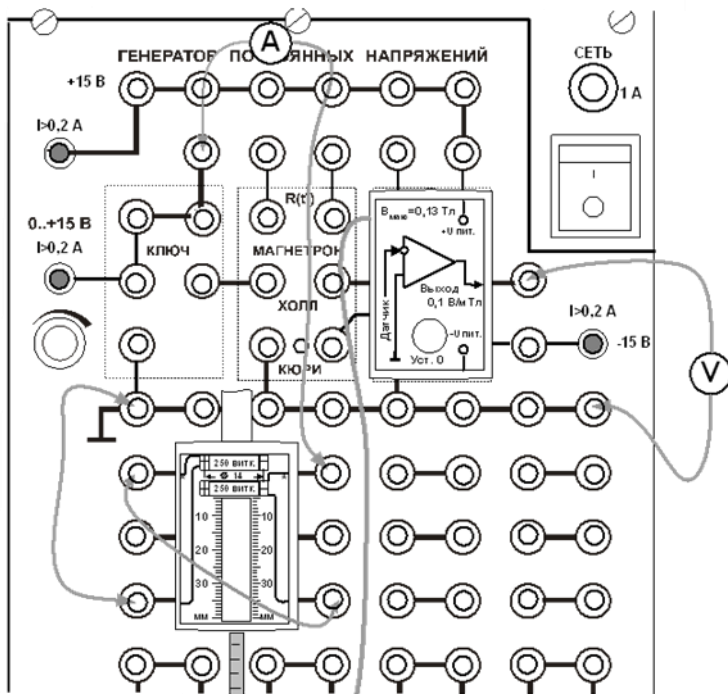


Рис. 9.2

Для измерения магнитной индукции на оси катушек используется миниблок «Тесламетр», в котором имеется зонд-щуп с датчиком Холла, который можно вводить внутрь катушек. Вдоль оси зонда нанесена миллиметровая шкала, позволяющая контролировать положение зонда внутри катушек. Датчик расположен на конце зонда перпендикулярно его оси так, что он регистрирует аксиальную составляющую поля. ЭДС Холла поступает в миниблок на вход усилителя напряжения, а к выходу усилителя подключается вольтметр (мультиметр). Перед проведением измерений необходимо установить ручкой «Установка нуля» нулевое значение выходного напряжения усилителя при отсутствии тока в катушках. Последнее достигается размыкани-

ем цепи питания катушек. Чувствительность тесламетра составляет 0,1 В/мТл.

### Порядок выполнения эксперимента

1. По заданию преподавателя включите в электрическую цепь одну или две катушки последовательно, установив их на определенном расстоянии друг от друга.

2. После сборки электрической схемы установки и включения источников питания установите нулевое показание тесламетра. Для этого отключите питание катушек путем разрыва цепи в точке подсоединения амперметра. Ручкой «Установка нуля» добейтесь минимального показания вольтметра ( $U_{\text{вых}} < 20\text{мВ}$ ).

3. Включите питание катушек (или катушки) и установите в них максимально допустимое значение тока (0,2 А) регулятором напряжения источника питания.

4. Перемещая зонд с датчиком Холла вдоль оси катушек с шагом 2,5 мм, запишите координаты и соответствующие им значения магнитной индукции в таблицу. Координату  $x = 0$  удобно принять в центре одной из катушек. Значение  $B$  магнитной индукции  $B$  (Тл) =  $10 U_{\text{вых}}$  (В). В ходе эксперимента время от времени отключайте питание катушки и корректируйте установку нуля тесламетра.

$x$ , мм	-10	-7,5	-5	-2,5	0	2,5	5	7,5	10	12,5	15
$U$ , В											
$B$ , мТл											

5. Постройте график изменения  $B(x)$  для рассмотренного случая.

6. Вычислите магнитную индукцию одной катушки по формуле (3) для условий опыта.

7. Нанесите расчетные точки на экспериментальный график.

8. Рассчитайте  $B(x)$  на компьютере, используя программу MathCAD.

### Контрольные вопросы

1. Сформулируйте и поясните закон Био – Савара – Лапласа.

2. Приведите примеры, демонстрирующие принцип суперпозиции магнитных полей.

3. Вычислите индукцию магнитного поля, образованного половиной кольца (четвертью кольца) с током.

4. Поясните принцип действия датчика Холла.

5. Объясните качественно, как происходит наложение полей двух катушек с различными направлениями токов в них.

**Литература:** 2. Гл. 14, §§ 110, 117; 3. Гл. 22, §§ 1-2; 4. Гл. 6, §§ 3,9,12.

### Лабораторная работа № 10 ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОСИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КАТУШКИ

**Приборы и принадлежности:** блок генераторов напряжений с наборным полем, миниблок «Цилиндрическая катушка», миниблок «Тесламетр», блок мультиметров.

**Цель работы:** измерение распределения индукции магнитного поля цилиндрической катушки на ее оси и подтверждение результатов теоретическими расчетами.

#### Теоретическое введение

Для расчета индукции  $\vec{B}$  магнитного поля на оси длинной цилиндрической катушки воспользуемся результатом вычисления индукции поля на оси короткой катушки (см. работу № 9, формула (3)). Для этого в пределах длинной катушки (рис. 10.1) выделим катушку очень малой длины  $dx$ . Число витков такой катушки будет равно  $dN = ndx = \frac{N}{l} dx$ . Здесь  $N$  – полное число витков катушки длиной  $l$ ,  $n = \frac{N}{l}$  – плотность числа витков в ней. Формула для индукции поля в точке  $A$  на оси цилиндрической катушки запишется аналогично формуле (3) работы № 9, если в ней заменить  $N$  на  $dN$ , а  $B_{\text{катушки}}$  на  $dB$ :

$$dB = \frac{\mu_0 N l dx}{2 l} \frac{R^2}{(R^2 + x^2)^{3/2}} = \frac{\mu_0 n l}{2} \frac{R^2}{(R^2 + x^2)^{3/2}} dx.$$

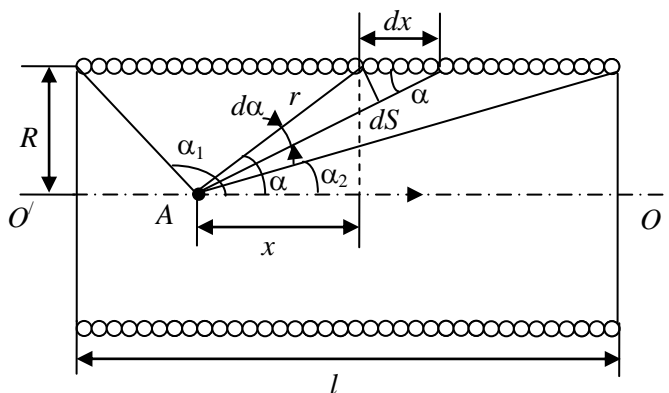


Рис. 10.1

Для последующего интегрирования этой формулы по всей длине катушки  $l$  удобнее перейти к интегрированию по углу  $\alpha$ . Из рис. 10.1 видно, что  $dS = r d\alpha$ ,  $dx = \frac{dS}{\sin \alpha} = \frac{r}{\sin \alpha} d\alpha$ ,  $x = r \cos \alpha$ ,  $r = \frac{R}{\sin \alpha}$ . После несложных преобразований получим:

$$dB = \frac{\mu_0}{2} nI \sin \alpha d\alpha. \quad (1)$$

Индукция поля внутри катушки в точке  $A$  определится путем интегрирования формулы (1) в пределах углов от  $\alpha_1$  до  $\alpha_2$ :

$$B = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{\mu_0}{2} nI \sin \alpha d\alpha = \frac{\mu_0}{2} nI \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \sin \alpha d\alpha = \frac{\mu_0}{2} nI (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1) \quad (2)$$

В каждой точке оси значение косинусов углов легко могут быть найдены из геометрических построений.

### Описание экспериментальной установки

На стенд генераторов постоянных напряжений устанавливают миниблоки «Цилиндрическая катушка» и «Тесламетр» как это показано на рис. 10.2. Подводят к катушке питание от регулируемого источника постоянного напряжения 0...15 В через амперметр  $A$ , в качестве которого используют один из имеющихся на стенде мультиметров. На лицевой панели миниблока «Цилиндрическая катушка» нанесены параметры катушки: число витков  $N$ , длина катушки  $l$  и ее диаметр  $2R$ . Максимальная допустимая сила тока в катушке  $I_{\max} = 0,2$  А.

Для измерения индукции магнитного поля используется тесламетр с датчиком Холла, установленным на конце зонда, перемещающегося внутри катушки. Для определения положения датчика служит шкала, нанесенная на зонд.

Выходное напряжение усилителя сигнала датчика  $U_{\text{ВЫХ}}$  измеряется вольтметром (второй мультиметр на стенде) и однозначно связано с индукцией магнитного поля:  $U_{\text{ВЫХ}} \text{ (В)} = 0,1 \cdot B \text{ (мТл)}$ . Перед началом работы необходимо при выключенной катушке установить нулевое значение  $U_{\text{ВЫХ}}$ , согласно процедуре, описанной в работе № 9.

### Порядок выполнения эксперимента

1. Соберите электрическую цепь согласно рис. 10.2.
2. После включения источников питания установите нулевое показание тесламетра.
3. Включите питание катушки, установите максимально допустимое значение силы тока (0,2 А) регулятором напряжения источника питания.

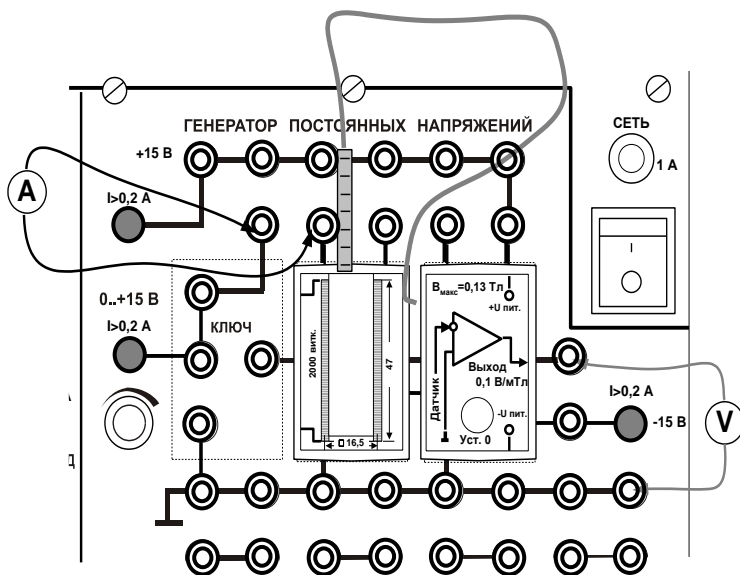


Рис. 10.2

4. Перемещая зонд с датчиком Холла вдоль оси катушки с шагом 5 мм, запишите координаты и соответствующие значения магнитной индукции в таблицу. Координату  $x = 0$  удобно расположить в середине длины катушки. Значение магнитной индукции  $B$  (Тл) =  $10 U_{\text{вых}}$  (В). Систематически корректируйте установку нуля тесламетра.

$x$ , мм	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
$U$ , В											
$B$ , мТл											

5. Постройте график зависимости  $B(x)$  для данной катушки.

6. Рассчитайте магнитную индукцию по формуле (2) в 5-7 точках оси катушки.

7. Нанесите расчетные точки на экспериментальный график. С помощью программы MathCAD попытайтесь построить всю кривую зависимости  $B(x)$  для цилиндрической катушки с имеющимися параметрами.

### Контрольные вопросы

1. Сформулируйте и поясните закон Био – Савара – Лапласа.
2. Как изменится расчетная величина индукции поля в различных точках данной цилиндрической катушки, если посчитать ее бесконечно длинной?
3. Как изменится индукция поля внутри соленоида при внесении в него железного сердечника?
4. Выведите формулу для индукции магнитного поля длинной катушки, исходя из закона полного тока.

**Литература:** 2. Гл. 14, §§ 110, 119; 3. Гл. 22, §§ 1-3; 4. Гл.6, §§ 2,3,12.

### Лабораторная работа № 11

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИНДУКТИВНО СВЯЗАННЫХ КАТУШЕК

**Приборы и принадлежности:** миниблок «кольцевые катушки», блок генераторов напряжений с наборным полем, блок мультиметров.

**Цель работы:** при заданном расстоянии между катушками определить индуктивность каждой катушки, взаимную индуктивность между ними, а также эквивалентную индуктивность катушек при их последовательном согласном и встречном соединениях. Построить экспериментальный график зависимости взаимной индуктивности двух кольцевых катушек от расстояния между ними.

### Теоретическое введение

Рассмотрим два контура с током (рис. 11.1). Магнитное поле, создаваемое первым контуром, будет частично пронизывать второй контур. Образно можно представить, что часть магнитных силовых линий первого контура одновременно пронизывает второй, как бы сцепляя оба контура. И наоборот, часть силовых линий магнитного поля, создаваемого вторым контуром, будет пронизывать первый. В этом случае говорят, что между обоими контурами существует магнитная связь. Наличие магнитной связи между контурами проявляется также в том, что при изменении силы тока в одном из контуров в другом наводится ЭДС индукции. Это явление называется взаимной индукцией.

Индукция магнитного поля контура 1 пропорциональна силе тока  $i_1$  в этом контуре. Поэтому магнитный поток  $\Phi_{21}$  через контур 2, создаваемый контуром 1, также пропорционален току  $i_1$ :

$$\Phi_{21} = L_{21}i_1. \quad (1)$$

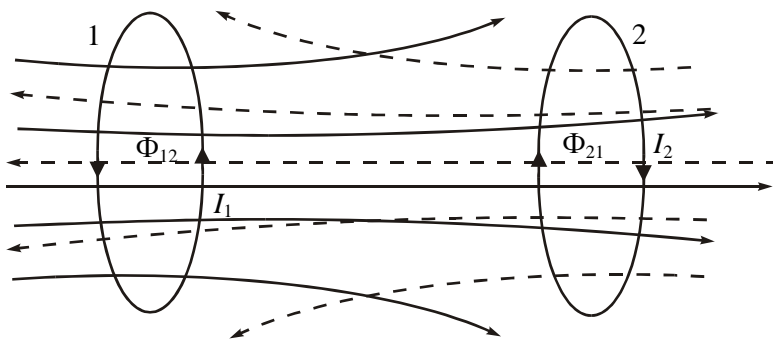


Рис. 11.1

Коэффициент  $L_{21}$  называется коэффициентом взаимной индукции контуров 1 и 2. Он по определению равен магнитному потоку через контур 2, создаваемому контуром 1 при силе тока в нем, равной единице. Поэтому размерность  $L_{21}$  – генри (Гн), такая же, что и размерность коэффициента самоиндукции (индуктивности).

Аналогично, если в контуре 2 течет ток  $i_2$ , то он создает магнитный поток через контур 1,

$$\Phi_{12} = L_{12}i_2. \quad (2)$$

Здесь  $L_{12}$  есть коэффициент взаимной индукции контуров 2 или 1.

При изменении тока в контуре 1 будет изменяться поток  $\Phi_{21}$  и, согласно закону электромагнитной индукции Фарадея, в контуре 2 возникнет ЭДС индукции

$$\varepsilon_2 = -\frac{d\Phi_{21}}{dt} = -L_{21} \frac{di_1}{dt}. \quad (3)$$

В свою очередь, при изменении тока  $i_2$  в контуре 2, в первом контуре будет наводиться ЭДС

$$\varepsilon_1 = -\frac{d\Phi_{12}}{dt} = -L_{12} \frac{di_2}{dt}. \quad (4)$$

Коэффициент взаимной индукции зависит от формы и размеров контуров и от их взаимного расположения. Он также зависит от свойств окружающей среды. Для любых двух контуров, находящихся в вакууме, коэффициенты взаимной индукции равны между собой:

$$L_{12} = L_{21}. \quad (5)$$

### Способ определения коэффициента взаимной индукции

Соединив две катушки последовательно таким образом, чтобы их магнитные поля совпадали по направлению (рис. 11.2, а), можем написать выражение для индуцированной в цепи этих катушек ЭДС самоиндукции:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_a}{dt} = -L_a \frac{di}{dt} = -\left( L_1 \frac{di}{dt} + L_2 \frac{di}{dt} + 2L_{12} \frac{di}{dt} \right) = -(L_1 + L_2 + 2L_{12}) \frac{di}{dt}$$

откуда

$$L_a = L_1 + L_2 + 2L_{12}, \quad (6)$$

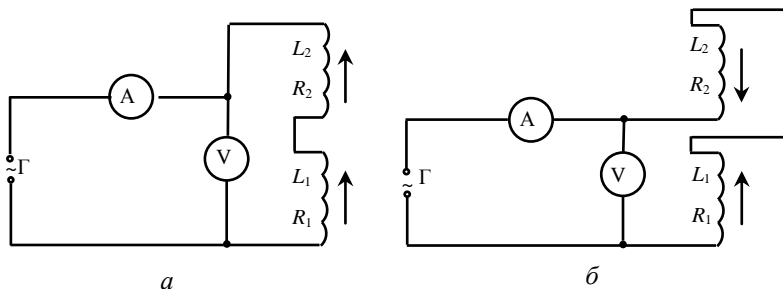


Рис. 11.2

где  $L_a$  – индуктивность двух последовательно соединенных катушек с одинаково направленными магнитными полями. Индуктивность  $L_a$  можно определить одним из методов измерения индуктивности и, в частности, методом, основанным на использовании закона Ома для цепи переменного тока, из которого следует

$$L_a = \frac{1}{\omega} \sqrt{Z_a^2 - (R_1 + R_2)^2}, \quad (7)$$

где  $Z_a$  – полное сопротивление цепи двух катушек, соединенных по схеме рис. 11.2, а;  $R_1$  и  $R_2$  – активные сопротивления катушек.

Теперь соединим катушки последовательно таким образом, чтобы их магнитные поля были направлены встречно (рис. 11.2, б). В этом случае ЭДС, индуцированная в цепи катушек,

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_6}{dt} = -L_6 \frac{di}{dt} = -\left(L_1 \frac{di}{dt} + L_2 \frac{di}{dt} - 2L_{12} \frac{di}{dt}\right) = -(L_1 + L_2 - 2L_{12}) \frac{di}{dt},$$

откуда

$$L_6 = L_1 + L_2 - 2L_{12}, \quad (8)$$

где  $L_6$  – индуктивность двух последовательно соединенных катушек для данного случая.

Вычитая из уравнения (6) уравнение (8), получаем:

$$L_a - L_6 = 4L_{12}, \quad (9)$$

откуда

$$L_{12} = \frac{L_a - L_6}{4}. \quad (10)$$

### Порядок выполнения эксперимента

1. Установите миниблок «Кольцевые катушки» в наборную панель, измерьте омметром активное сопротивление каждой катушки и запишите результат:

$$R_1 = \dots \text{ Ом}; \quad R_2 = \dots \text{ Ом}.$$

2. Подайте синусоидальное напряжение частотой 2...2,5 кГц на первую катушку от генератора напряжений специальной формы, как показано на рис.11. 3 а) и установите ток в катушке 150...200 мА. Измерения можно производить как мультиметрами, так и виртуальными приборами. Запишите значения тока и частоты:

$$I = \dots \text{ мА}; \quad f = \dots \text{ кГц}; \quad \omega = 2\pi f = \dots \text{ 1/с}.$$

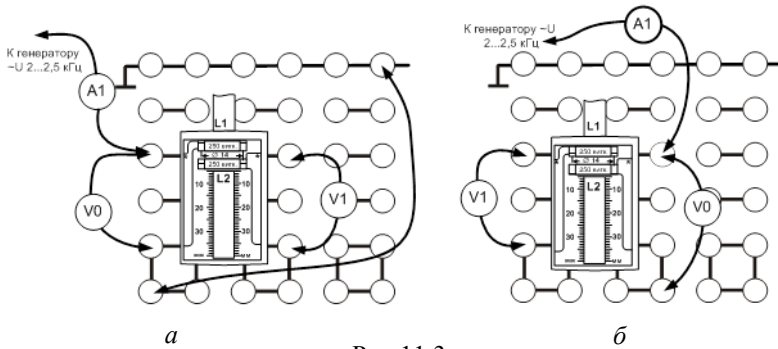


Рис.11.3

3. Увеличивая расстояние  $x$  между катушками от минимального значения 5 мм до 20...25 мм с шагом 2...2.5 мм, запишите в табл. 1 значения ЭДС  $\varepsilon_m$ , индуцируемой во второй катушке (по вольтметру V1) для каждого значения  $x$ . Частоту и ток в этом опыте поддерживайте неизменным, так как ток может самопроизвольно уменьшаться по мере нагрева катушки.

Таблица 1

$x$ , мм	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20
$\varepsilon_m$ , В							
$L_{12}$ , мГн							

4. Рассчитайте взаимную индуктивность  $L_{12} = \varepsilon_m / (\omega I)$  и постройте график  $L_{12}(x)$ .

5. Установите подвижную катушку в заданное преподавателем положение и запишите в табл. 2 показания приборов:  $U$  и  $I$  – напряжение и ток в первой катушке,  $\varepsilon_m$  – напряжение на второй катушке (индуктируемая ЭДС).

6. Поменяйте местами катушки, т.е. питание подайте на вторую катушку, как показано на рис. 11.3, б) и повторите опыт.

7. Рассчитайте значения параметров катушек, указанных в табл. 2:

$$Z = U/I - \text{полное сопротивление катушки};$$

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2} - \text{индуктивное сопротивление};$$

$$L = X/\omega - \text{индуктивность};$$

$$L_{12} = \varepsilon_m/\omega - \text{взаимная индуктивность}.$$

Таблица 2

Схема опыта	$U$ , В	$I$ , мА	$\varepsilon_m$ , В	$Z$ , Ом	$X$ , Ом	$L$ , мГн	$L_{12}$ , мГн
Питание подано на 1-ю кат.							
Питание подано на 2-ю кат.							

8. Соедините две катушки последовательно согласно рис. 11.4, а и занесите показания приборов в соответствующую строку табл 3.

Таблица 3

Схема опыта	$U$ , В	$I$ , мА	$Z$ , Ом	$X$ , Ом	$L$ , мГн
Последовательное согласное соединение					
Последовательное встречное соединение					

9. Поменяйте местами зажимы одной из катушек и запишите показания приборов в строку «Последовательное встречное соединение».

10. Рассчитайте эквивалентные параметры  $Z$ ,  $X$  и  $L$  для двух случаев последовательного соединения, считая  $R = R_1 + R_2$ . Объясните, почему эквивалентные индуктивности в этих двух случаях отличаются.

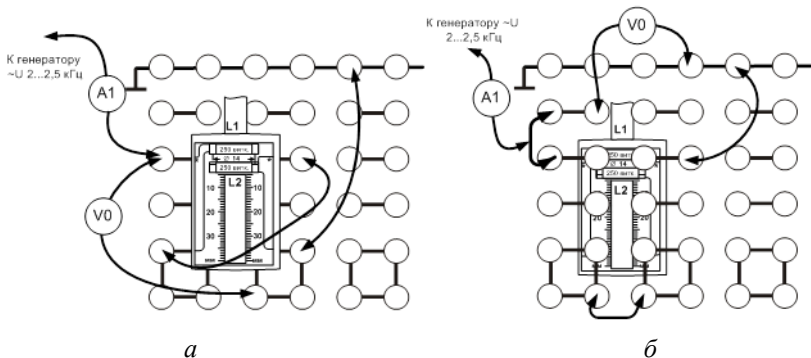


Рис. 11.4

11. По данным двух последних опытов рассчитайте также взаимную индуктивность  $L_{12} = \frac{(L_a - L_6)}{4}$ , где  $L_a$  – индуктивность последовательного согласного соединения,  $L_6$  – индуктивность последовательного встречного соединения, которые находятся из табл. 3 и сравните её с найденными ранее значениями.

### Контрольные вопросы

1. Сформулируйте закон электромагнитной индукции Фарадея и правило Ленца.
2. В чем состоит явление взаимной индукции?
3. Чему равна ЭДС взаимной индукции двух контуров?
4. Объясните график зависимости  $L_{12}(x) = f(x)$ .

**Литература:** 2. Гл. 15, §§ 122, 123, 128, 129; 3. Гл. 25, §§ 1-3; 4. Гл.13, §§ 1-2,7.

### Лабораторная работа № 12

#### СНЯТИЕ ОСНОВНОЙ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ ФЕРРОМАГНЕТИКА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ

**Приборы и принадлежности:** блок генераторов напряжений с наборным полем, миниблок «Трансформатор тороидальный», миниблок «Интегратор», мультиметры, резисторы.

**Цель работы:** снятие основной кривой намагничивания ферромагнетика и определение магнитной проницаемости.

## Теоретическое введение

В пространстве, окружающем движущиеся заряды, существует магнитное поле, которое характеризуется вектором индукции магнитного поля (магнитной индукции)  $\vec{B}$ . Магнитное поле генерируется не только зарядами, движущимися в проводниках под действием сил электрического поля (макротоки), но и зарядами, движущимися в атомах и молекулах вещества (микротоки). Магнитная индукция в среде равна усредненному по малым макроскопическим объемам значению микроскопического магнитного поля.

Кроме того, электроны имеют собственный момент импульса, называемый спином, не связанный с движением частицы как целого и имеющий квантовую природу. Спину соответствует элементарный спиновый магнитный момент.

В обычном состоянии совокупность микротоков и спиновых магнитных моментов не создает магнитного поля, поскольку магнитные моменты отдельных частиц ориентированы беспорядочно и их результирующий магнитный момент в веществе равен нулю. Под действием внешнего магнитного поля, в которое помещается вещество, магнитные моменты отдельных частиц  $\vec{p}_{mi}$  получают упорядоченную ориентацию в пространстве, вследствие чего полный магнитный момент в веществе будет отличен от нуля. Магнитный момент намагниченного тела

$$\vec{P}_m = \sum_{i=1}^N \vec{p}_{mi}.$$

Для характеристики магнитного состояния макроскопического тела применяют величину, называемую намагниченностью

$$\vec{j} = (\sum_{i=1}^N \vec{p}_{mi}) / V,$$

где  $V$  – объем, в котором просуммированы элементарные магнитные моменты.

Единицей измерения намагниченности является ампер на метр ( $[J]=1 \frac{A}{m}$ ).

Между магнитной индукцией поля в веществе и намагниченностью существует связь, даваемая уравнением, выражающим закон полного тока,

$$\oint_L (\vec{H} d\vec{l}) = \oint_L \left( \left( \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{j} \right) d\vec{l} \right) = \sum_{k=1}^N I_k,$$

где  $\sum_{k=1}^N I_k$  – алгебраическая сумма всех макротоков, протекающих через поверхность, ограничиваемую контуром интегрирования,  $\vec{H}$  – напряженность магнитного поля,  $\mu_0$  – магнитная постоянная.

Напряженность выражается соотношением

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{j},$$

соответственно индукция магнитного поля

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{j}). \quad (1)$$

В случае однородного магнитного поля уравнение (1) допускает прямую интерпретацию, базирующуюся на том, что магнитное поле в веществе складывается из индукции магнитного поля макротоков (внешнего) и поля микротоков. Связь между  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$  для изотропных магнетиков может быть выражена соотношением

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}, \quad (2)$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость вещества.

Для ферромагнетиков магнитная проницаемость сложным образом зависит от индукции магнитного поля в веществе и напряженности его в силу того, что зависимость  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$  в ферромагнетике носит не линейный характер (рис.12.1). Эта кривая называется основной кривой намагничивания. График зависимости  $\mu$  от  $H$ , вычисленный на основании (2), позволяет определить  $\mu$  в широком интервале  $H$  (рис.12.2). Магнитная проница-

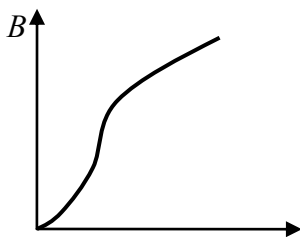


Рис. 12.1

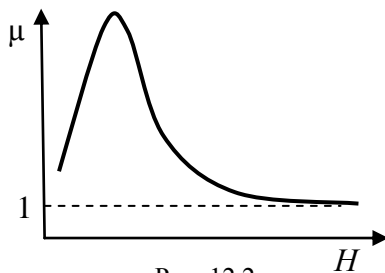


Рис. 12.2

мость для ферромагнетиков достигает сотен, тысяч и даже сотен тысяч единиц в максимуме и стремится к единице при очень

сильных магнитных полях. Впервые экспериментально зависимость  $B$  от  $H$  была установлена А.Г. Столетовым.

Теория ферромагнетиков (железо, никель, хром, кобальт, гадолиний, диспрозий, тербий и т.д.) может быть построена учетом наличия обменных сил, рассматриваемых в квантовой механике. Действие этих сил между соседними атомами ферромагнетика приводит к параллельной ориентации спиновых магнитных моментов. Таким образом, в отсутствие внешнего магнитного поля объем ферромагнетика разбивается на совокупность малых макроскопических областей (доменов). Каждый из этих доменов намагничен до насыщения. Магнитные моменты доменов  $\vec{p}_m$  ориентированы хаотически. При наложении внешнего магнитного поля на ферромагнетик происходит смещение границ доменов за счет роста тех из них, которые имеют более острый угол между вектором  $\vec{P}_m$  и направлением вектора  $\vec{H}$ . Этому процессу соответствует наиболее крутая часть зависимости  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$ . В состоянии магнитного насыщения все  $\vec{P}_m$  ориентированы по полю, а дальнейший рост  $\vec{B}$  связан с увеличением макротокков.

Намагниченность ферромагнетиков зависит не только от напряженности магнитного поля, но и от его предыдущего со-

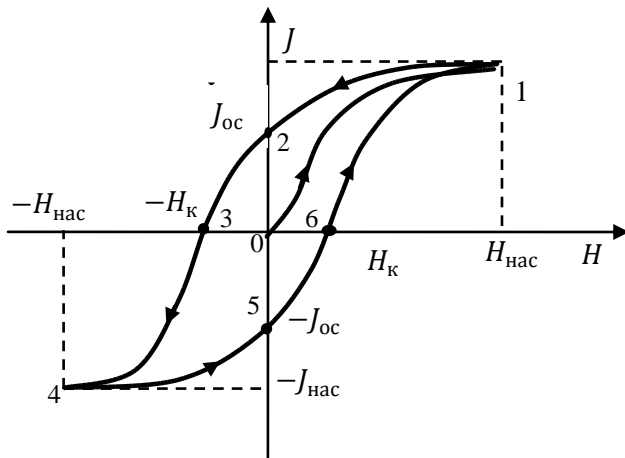


Рис. 12.3

стояния (гистерезис). Типичная кривая зависимости  $J$  от  $H$  представлена на рис. 12.3.

Характерная особенность ферромагнетиков состоит в том, что для них зависимость  $J$  от  $H$  (а следовательно, и  $B$  от  $H$ ) определяется предысторией намагничивания ферромагнетика. Это явление получило название магнитного гистерезиса. Если намагнитить ферромагнетик до насыщения (точка 1, рис.12.3), а затем начать уменьшать напряженность  $H$  намагничивающего поля, то, как показывает опыт, уменьшение  $J$  описывается кривой 1 – 2, лежащей выше кривой 1 – 0. При  $H = 0$   $J$  отличается от 0, т.е. в ферромагнетике наблюдается остаточное намагничивание  $J_{oc}$ . С наличием остаточного намагничивания связано существование постоянных магнитов. Намагничивание обращается в нуль под действием поля  $H_k$ , имеющего направление, противоположное полю, вызвавшему намагничивание. Напряженность  $H_k$  называется коэрцитивной силой.

При дальнейшем увеличении противоположного поля ферромагнетик перемагничивается (кривая 3 – 4), при  $H = -H_{нас}$  достигается насыщение (точка 4). Затем ферромагнетик можно опять размагнитить (кривая 4 – 5 – 6) и вновь перемагнищить до насыщения (кривая 1 – 6).

Таким образом, при действии на ферромагнетик переменного магнитного поля намагниченность  $J$  меняется в соответствии с кривой 1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6, которая называется петлей гистерезиса (от греч. «запаздывание»). Гистерезис приводит к тому, что намагничивание ферромагнетика не является однозначной функцией  $H$ , т.е. одному и тому же значению  $H$  соответствует несколько значений  $J$ .

При намагничивании единичного объема совершается работа

$$\delta A = d\left(\frac{1}{2} \mu_0 H^2\right) = (\vec{H} d\vec{B}),$$

т.е. за полный цикл совершается работа  $A = \oint \delta A = \oint (\vec{H} d\vec{B})$ , равная площади петли гистерезиса.

### Описание экспериментальной установки

Принципиальная схема экспериментальной установки показана на рис. 12.4

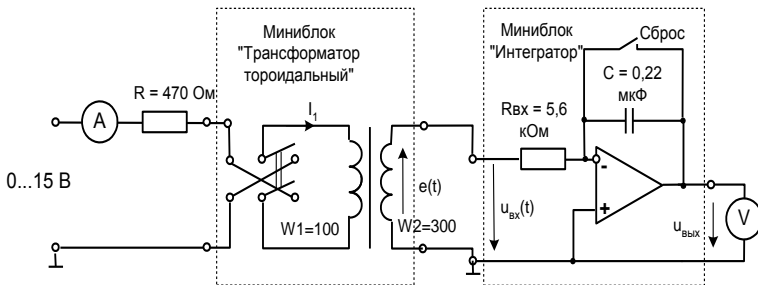


Рис. 12.4

Исследуемый образец ферромагнетика представляет собой кольцевой сердечник из феррита, сечение и длина средней линии которого указаны на этикетке миниблока «Трансформатор тороидальный». На сердечнике имеются две катушки. Катушка  $w_1=100$  витков подключается к источнику регулируемого постоянного напряжения и служит для создания магнитного поля в сердечнике. Направление тока можно изменять тумблером на миниблоке. К другой катушке ( $w_2=300$  витков) подключён интегратор.

При переключении тумблера магнитный поток изменяется от  $-\Phi$  до  $+\Phi$  и в процессе этого изменения во вторичной катушке наводится ЭДС

$$\varepsilon(t) = w_2 \frac{d\Phi}{dt}.$$

Выходное напряжение интегратора:

$$u_{\text{ВЫХ}} = \frac{1}{R_{\text{вх}} C} \int_0^t u_{\text{ВХ}}(t) dt + u_{\text{ВЫХ}}(0),$$

где  $R_{\text{вх}}$  и  $C$  – параметры интегратора, а  $u_{\text{вх}}(t) = \varepsilon(t)$ .

На интеграторе имеется переключатель «Сброс», с помощью которого перед началом интегрирования устанавливается  $u_{\text{ВЫХ}}(0)=0$ .

Поэтому

$$u_{\text{ВЫХ}} = \frac{1}{R_{\text{вх}} C} \int_0^t w_2 \frac{d\Phi}{dt} dt = \frac{1}{R_{\text{вх}} C} \int_{-\Phi}^{+\Phi} d\Phi = \frac{2w_2}{R_{\text{вх}} C} \Phi = \frac{2w_2}{R_{\text{вх}} C} BS,$$

где  $S$  – сечение сердечника, а  $B$  – магнитная индукция.

Отсюда магнитная индукция в сердечнике:

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{R_{\text{вх}}C}{2w_2S} u_{\text{ВЫХ}}. \quad (1)$$

Напряжённость магнитного поля определяется по закону полного тока:

$$H = \frac{I_1 w_1}{l}, \quad (2)$$

где  $l$  – длина средней линии сердечника.

### Задание

Снять экспериментально основную кривую намагничивания ферромагнетика, рассчитать и построить графики  $B(H)$  и  $\mu(H)$ .

Параметры сердечника:  $l = 50$  мм;  $S = 24$  мм<sup>2</sup>.

Параметры катушек:  $w_1 = 100$ ;  $w_2 = 300$ .

Параметры интегратора:  $R_{\text{вх}} = 5,6$  кОм;  $C = 0,22$  мкФ.

Расчётные формулы:

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{R_{\text{вх}}C}{2w_2S} u_{\text{ВЫХ}} = \frac{5,6 \cdot 10^3 \cdot 0,22 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 300 \cdot 24 \cdot 10^{-6}} u_{\text{ВЫХ}} = 0,0856 U_{\text{ВЫХ}} \text{ Тл};$$

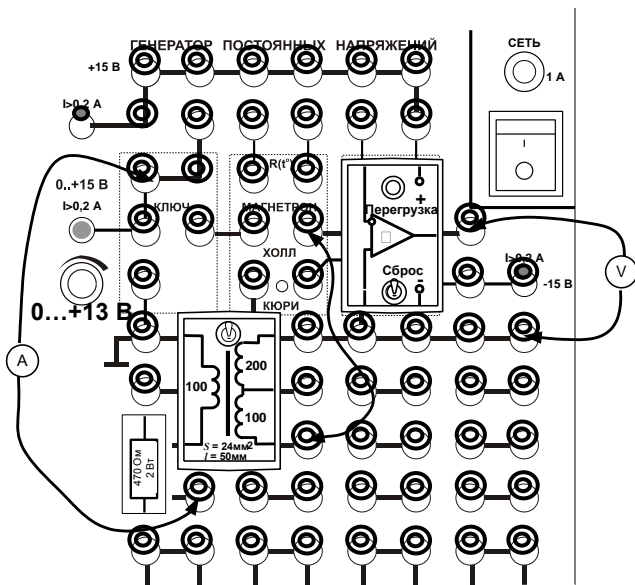


Рис. 12.5

$$H = \frac{I_1 w_1}{l} = \frac{100}{0,05} I_1 = 2000 I_1 \text{ А/м.}$$

### Порядок выполнения эксперимента

1. Соберите лабораторную установку как показано на рис. 12.5. В качестве амперметра и вольтметра используйте мультиметры, либо виртуальные приборы.

2. Включите блок генераторов и установите регулятором напряжения первое значение тока в намагничивающей катушке (например, 2 мА).

3. Переведите переключатель «Сброс» интегратора в верхнее положение, убедитесь, что на его выходе установилось нулевое напряжение ( $\pm 10 \dots 20$  мВ), верните переключатель в нижнее положение и сразу же переключите переключатель на миниблоке «Трансформатор тороидальный». Занесите значение выходного напряжения в таблицу.

$I$ , мА	$U_{\text{вых}}$ мВ	$H$ , А/м	$B$ , Тл	$\mu$	$H_{\text{ср}}$ , А/м
2					
4					
6					
8					
10					
15					
20					
30					
40					
50					

*Примечание:* После завершения этих операций выходное напряжение интегратора будет медленно изменяться в ту или другую сторону вследствие утечек и неточной балансировки усилителя. Поэтому нужно зафиксировать значение выходного напряжения в течение первых двух-трёх секунд после переключения тока. Для большей достоверности повторите этот опыт несколько раз и запишите в таблицу среднее, либо наиболее часто повторяющееся значение выходного напряжения.

4. Постепенно увеличивайте ток намагничивания и повторяйте опыт при каждом его значении, записывая результаты в таблицу. При необходимости замените токоограничивающий резистор 470 Ом на 100 Ом.

5. Вычислите магнитную индукцию и напряженность магнитного поля по формулам (1) и (2).

6. Вычислите магнитную проницаемость по двум соседним в таблице значениям:

$$\mu = \frac{1}{\mu_0} \frac{B_{n+1} - B_n}{H_{n+1} - H_n},$$

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

7. Постройте графики  $B(H)$  и  $\mu(H)$ , относя каждое вычисленное значение  $\mu$  к среднему значению напряжённости

$$H_{\text{ср}} = \frac{H_{n+1} + H_n}{2}.$$

### Контрольные вопросы

1. Объясните схему и работу установки.
2. Что такое остаточная намагничённость ферромагнетиков?
3. Объясните механизм необратимости процесса намагничивания ферромагнетиков.
4. Объясните (качественно) механизм обменных взаимодействий. Почему в отсутствии внешнего поля домены ферромагнетиков ориентируются хаотично?
5. Какова природа ферромагнетизма?
6. Объясните графики зависимости  $B = f(H)$  для пара- и диамагнетиков.
7. Объясните график зависимости  $\mu = f(H)$ .
8. Что происходит в ферромагнетиках при  $\mu = \mu_{\text{max}}$ ,  $\mu = 1$ ?

9. Объясните полученные графики  $B = f(H)$  и  $\mu = f(H)$ .

10. Приведите примеры применения ферромагнетиков с узкой и с широкой петлей гистерезиса.

**Литература:** 2. Гл. 16, §§ 133-136; 3. Гл. 24, §§ 1-5; 4. Гл.7, §§ 1-6.

### Лабораторная работа № 13

#### **СНЯТИЕ ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА, ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧКИ КЮРИ И НАМАГНИЧЕННОСТИ НАСЫЩЕНИЯ ФЕРРОМАГНЕТИКА**

**Приборы и принадлежности:** блок генераторов напряжений с наборным полем, осциллограф, миниблоки: «Точка Кюри», «Интегратор», «Электронный ключ», набор проводов, компьютер и коннектор.

**Цель работы:** снятие петли гистерезиса, определение точки Кюри, определение магнитной индукции насыщения и намагниченности насыщения ферромагнетика при  $T=0$  К.

#### **Теоретическое введение**

Ферромагнетики – твердые вещества, в кристаллическом состоянии обладающие самопроизвольной (спонтанной) намагниченностью в отсутствие внешнего магнитного поля. К ферромагнетикам кроме железа (от него и идет название ферромагнетики) относятся никель, кобальт, гадолиний, некоторые редкоземельные элементы, ферриты, а также сплавы и соединения марганца и хрома.

Ферромагнетики помимо способности сильно намагничиваться обладают еще и другими свойствами, существенно отличающими их от диамагнетиков и парамагнетиков. Если для диамагнетиков и парамагнетиков зависимость  $J$  от  $H$  линейна, то для ферромагнетиков эта зависимость является довольно сложной. На рис. 13.1 дана кривая намагничивания ферромагнетика, магнитный момент которого первоначально был равен нулю (она называется основной или нулевой кривой намагничивания).

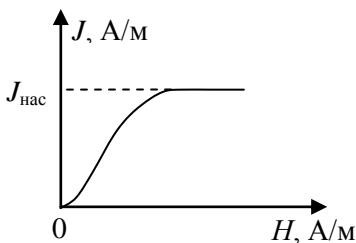


Рис. 13.1

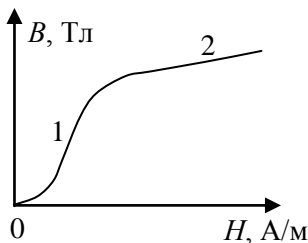


Рис. 13.2

Уже в полях порядка  $\sim 100$  А/м намагниченность  $J$  достигает насыщения.

График зависимости  $B$  от  $H$  (рис.13.2) отличается  $J$  от  $H$  (рис. 13.1) отсутствием горизонтальной части. Магнитная индукция  $B = \mu_0(H + J)$  растет по линейному закону после наступления насыщения  $J_{\text{нас}} = \text{const}$ , тогда  $B = \mu_0 H + \text{const}$ , где  $\text{const} = \mu_0 J_{\text{нас}}$ .

Особенно интересным для ферромагнетиков является зависимость магнитной проницаемости  $\mu$  от  $H$  (рис. 13.3). В начале  $\mu$  растет с увеличением  $H$  за счет резкого увеличения  $J$ . Когда наступит насыщение  $J_{\text{нас}} = \text{const}$ ,  $\mu$  начинает уменьшаться, стремясь к 1 в сильных полях. Это объясняется тем, что  $B = \mu\mu_0 H$ ;  $\mu = \frac{B}{\mu_0 H} = \frac{\mu_0(H+J)}{\mu_0 H} = 1 + \frac{J}{H}$ , поэтому при  $J = J_{\text{нас}} = \text{const}$  с ростом  $H$  отношение  $\frac{J}{H} \rightarrow 0$ , а  $\mu \rightarrow 1$ .

Кроме нелинейной зависимости между  $J$  и  $H$  (или между  $B$  и  $H$ ), для ферромагнетиков характерно также наличие гистерезиса. Если довести намагничивание до насыщения (точка 1 на рис. 13.4) и затем уменьшать напряженность магнитного поля  $H$ , то индукция  $B$  следует не по первоначальной кривой 0–1, а изменяется в соответствии с кривой 1–2. В результате, когда напряженность внешнего поля  $H$  станет равной нулю (точка 2), намагничивание не исче-

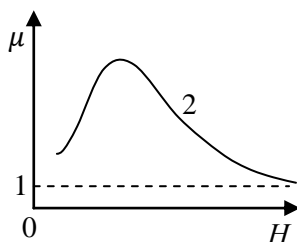


Рис. 13.3

зает и характеризуется величиной  $B_{\text{ост}}$ , которая называется остаточной индукцией.

Индукция  $B$  обращается в 0 лишь под действием поля  $H_k$ , имеющим направление, противоположное полю, вызвавшему намагничивание. Напряженность  $H_k$  называется коэрцитивной силой.

При действии на ферромагнетик переменного магнитного поля индукция изменяется в соответствии с кривой 1-2-3-4-5-6-1 (рис. 13.4), которая называется петлей гистерезиса (от греч. «запаздывание»). Гистерезис приводит к тому что намагничивание ферромагнетика не является однозначной функцией  $H$ .

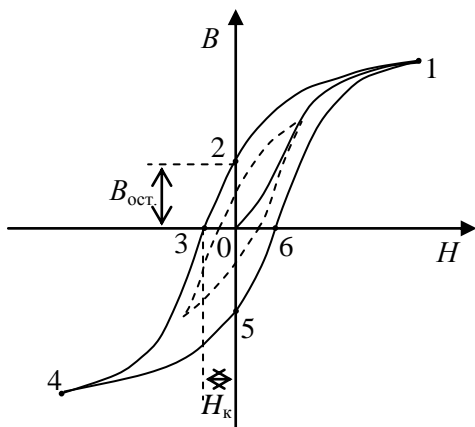


Рис. 13.4

максимальные значения  $H$  таковы, что намагниченность достигает насыщения, получается максимальная петля гистерезиса (сплошная петля на рис. 13.4). Если при амплитудных значениях  $H$  насыщение не достигается, получается частный цикл (пунктирная петля на рис. 13.4). Частных циклов может быть бесконечное множество, все они лежат внутри максимальной

петли гистерезиса.

Различные ферромагнетики имеют разные гистерезисные петли. Ферромагнетики с малым значением коэрцитивной силы ( $H_k \sim 0,8 - 8 \text{ А/м}$ ) и узкой петлей гистерезиса называются мягкими. С большой остаточной индукцией  $B_{\text{ост}} \sim 1 \text{ Тл}$  и значением коэрцитивной силы ( $H_k \sim 10^4 - 10^5 \text{ А/м}$ ) (с широкой петлей гистерезиса) – жесткими. Площадь петли гистерезиса пропорциональна количеству теплоты, выделяющемуся в единице объема ферромагнетика за один цикл перемагничивания.

Величины  $H_K$ ,  $J_K$  и  $\mu_{\max}$  определяют применимость ферромагнетиков для тех или иных практических целей. Так, жесткие ферромагнетики (углеродистые и вольфрамовые стали) применяются для изготовления постоянных магнитов, а мягкие (мягкое железо, сплав железа с никелем) – для изготовления сердечников трансформаторов и электрических машин переменного тока.

Ферромагнетики обладают еще одной существенной особенностью: для каждого ферромагнетика имеется определенная температура, называемая точкой Кюри ( $T_K$ ), при которой он теряет свои ферромагнитные свойства. При нагревании образца выше точки Кюри ферромагнетик превращается в обычный парамагнетик. Переход вещества

из ферромагнитного состояния в парамагнитное, происходящий в точке Кюри, не сопровождается поглощением или выделением теплоты, т.е. в точке Кюри происходит фазовый переход II рода. Точка Кюри  $T_K$  у железа равна 1043 К, у кобальта – 1403 К и у никеля – 631 К.

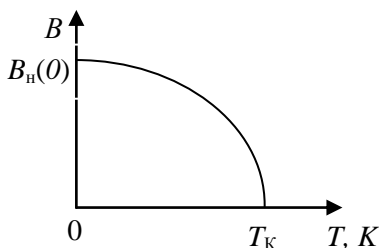


Рис. 13.5

При охлаждении ниже точки Кюри ферромагнетик приобретает первоначальные свойства. Магнитные свойства ферромагнетиков обладают специфической зависимостью от температуры. Намагниченность насыщения  $J_n$  (и индукции  $B_n$ ) имеют наибольшее значение при  $T = 0$  К, т.е.  $J_n(0)$  и  $B_n(0)$  и монотонно уменьшается до 0 при стремлении температуры образца к  $T_K$  (рис. 13.5).

В последнее время большое значение приобрели полупроводниковые ферромагнетики – ферриты, химические соединения типа  $MeO \cdot Fe_2O_3$ , где  $Me$  – ион двухвалентного металла (Mn, CO, Ni, Cu, Mg, Zn, Cd, Fe).

Они отличаются заметными ферромагнитными свойствами и большим удельным электрическим сопротивлением. Ферриты применяются для изготовления постоянных магнитов, ферритовых антенн, сердечников, радиочастотных контуров, элементов

оперативной памяти, для покрытия магнитофонных, видеомагнитофонных пленок и пластиковых карт.

### Описание экспериментальной установки

Принципиальная схема экспериментальной установки показана на рис. 13.6.

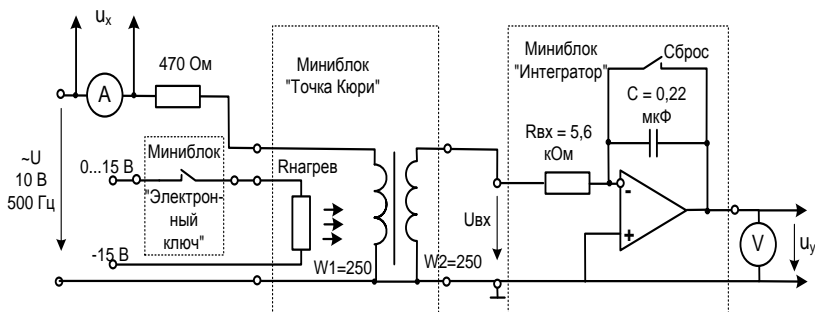


Рис. 13.6

Исследуемый образец ферромагнетика представляет собой кольцевой сердечник из феррита, сечение и длина средней линии которого указаны на этикетке миниблока «точка Кюри». Параметры сердечника: средняя длина сердечника  $l$  – 41мм; площадь поперечного сечения  $S$  – 13,5 мм. На сердечнике имеются две одинаковых катушки: количество витков первичной обмотки  $w_1$  – 250; количество витков вторичной обмотки  $w_2$  – 250.

Одна из катушек подключается к источнику синусоидального напряжения и служит для создания переменного магнитного потока в сердечнике. Напряженность магнитного поля можно найти, применяя закон полного тока для магнитного поля в среде:

$$H = \frac{I_1 w_1}{l}. \quad (1)$$

К другой катушке подключён интегратор. Выходное напряжение интегратора:

$$u_{вых} = \frac{1}{R_{вх} C} \int u_{вх}(t) dt = \frac{1}{R_{вх} C} \int w_2 \frac{d\Phi}{dt} dt = \frac{w_2}{R_{вх} C} \Phi = \frac{w_2}{R_{вх} C} BS,$$

где  $R_{\text{вх}}$  и  $C$  – параметры интегратора,  $S$  – сечение сердечника,  $B$  – магнитная индукция.

Для исключения постоянной составляющей переключатель «Сброс» интегратора должен находиться в замкнутом состоянии.

Отсюда магнитная индукция в сердечнике:

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{R_{\text{вх}} C}{w_2 S} i_{\text{вых}}, \quad (2)$$

где  $R_{\text{вх}} - 5,6$  кОм;  $C - 0,22$  мкФ.

Напряжение  $u_x$  с шунта амперметра подаётся на горизонтальный вход виртуального осциллографа, а напряжение  $u_y$  с выхода интегратора – на вертикальный вход. Поскольку первое пропорционально напряжённости магнитного поля, а второе – магнитной индукции, на экране осциллографа отображается в определённом масштабе зависимость  $B=B(H)$ .

Нагревание образца осуществляется встроенным в миниблок «точка Кюри» резистором  $R_{\text{нагрев}}$ . Напряжение на нём можно регулировать от 15 до 30 В с помощью ручки управления регулируемого источника постоянного напряжения. С увеличением напряжения увеличивается яркость свечения сигнальной лампочки, встроенной в миниблок.

В компьютеризованном варианте стенда регулирование нагрева осуществляется включением и выключением нагревателя с помощью миниблока «Электронный ключ» (ЭК) и виртуального прибора «Термометр/термостат». Измерение температуры производится с помощью термопары, встроенной в миниблок «Точка Кюри» и виртуального термометра.

#### *Задание*

Снять экспериментально петлю гистерезиса ферромагнетика при различных температурах, определить температуру Кюри, намагниченность насыщения. Определить магнитную индукцию насыщения  $B_n(0)$  при  $T = 0$  К путем экстраполяции графика  $B_n(T)$ .

### **Порядок выполнения эксперимента**

1. Соберите лабораторную установку по схеме рис. 13.7 и установите пределы измерения вольтметра V1 - 1 В и ампермет-

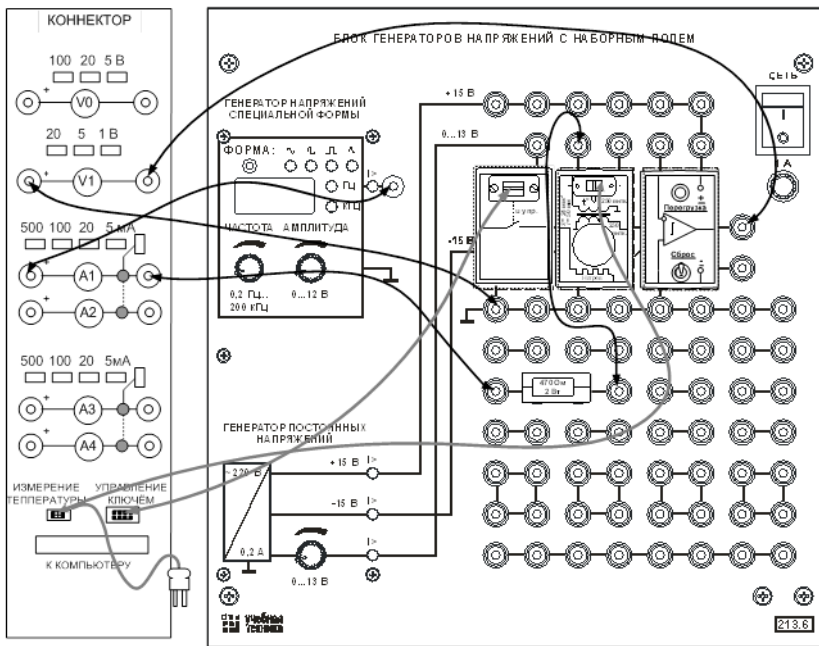


Рис. 13.7

ра А1 – 20 мА. Регулятор источника напряжения 0...15 В выведите в крайнее правое положение. Переключатель интегратора установите в положение «Сброс».

2. Включите компьютер и откройте блок виртуальных приборов «Приборы I». Активизируйте в верхнем окне этого блока прибор V1, а в третьем сверху – А3 и установите род измеряемой величины – «Амплитуда».

3. Включите виртуальный осциллограф, «подключите» к его первому каналу сигнал V1, а к третьему – сигнал А1. Установите длительность развёртки 500 мкс/дел.

4. Включите блок генераторов напряжений, установите на генераторе напряжений специальной формы синусоидальный сигнал частотой 200...250 Гц максимальной амплитуды.

5. Убедитесь, что на виртуальном осциллографе появилось изображение примерно одного периода двух сигналов: кривая белого цвета соответствует изменению магнитного потока, кри-

вая зелёного цвета – изменению тока. При необходимости сместите изображение по горизонтали, в центр экрана.

6. Включите режим X-Y осциллографа и убедитесь, что на экране появилось изображение петли гистерезиса. Отрегулируйте намагничивающий ток таким образом, чтобы максимальное значение магнитной индукции соответствовало границе области насыщения. Для этого уменьшайте ток до тех пор, пока не исчезнут однолинейные концы петли гистерезиса.

7. Зафиксируйте масштабы разверток осциллографа нажатием кнопок 1 и 3 на блоках входов. При этом кнопки приобретают красный цвет, и в дальнейшем масштабы автоматически изменяться не будут.

8. Откройте виртуальный прибор «Термометр/термостат» и запишите в таблицу исходные значения температуры, амплитуды тока и амплитуды выходного напряжения интегратора.

$t, ^\circ\text{C}$								
$U_{\text{макс}}, \text{мВ}$								
$B_{\text{н}}, \text{Тл}$								
$T, \text{К}$								

9. Перерисуйте петлю гистерезиса на бумагу или сделайте печатную копию дисплея виртуального осциллографа. Для этого нажмите Alt+PrtSc и вставьте рисунок в какой-нибудь свой файл.

10. Включите термостат, щёлкнув мышкой на клавише «Включить термостат», и введите значение температуры, до которой вы желаете нагреть образец. Следите за процессом нагрева по красному столбику виртуального термометра.

11. Когда заданная температура будет достигнута и нагрев отключится, запишите новые значения температуры, амплитуды тока и напряжения в таблицу и введите следующее заданное значение температуры.

12. Повторяйте опыт до достижения точки Кюри ( $110 - 130^\circ\text{C}$ ), после чего сразу же отключите нагрев.

13. Рассчитайте значения  $B_{\text{н}}$  по формуле (2), переведите температуру в кельвины и постройте график  $B_{\text{н}}(T)$ .

14. Определите магнитную индукцию насыщения путём экстраполяции графика  $B_n(0)$  (пример рис. 13.8) при  $T = 0$  К:

$$B_n(0) = B_{n1} + \frac{B_{n1} + B_{n2}}{2},$$

где  $B_{n1}$  и  $B_{n2}$  найдем из графика; намагниченность насыщения при  $T = 0$  К:

$$J_n(0) = \frac{B_n(0)}{\mu_0} - H_n(0),$$

где  $H_n(0)$  – вычислим по формуле (1).

### Контрольные вопросы

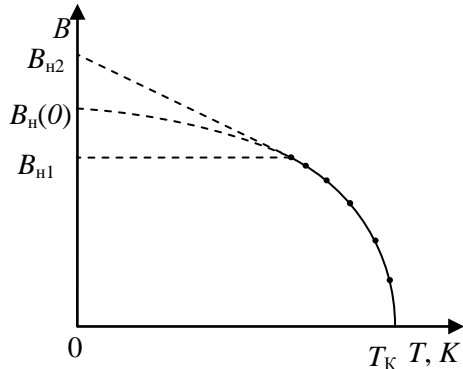
1. Что такое намагниченность? Какая величина может служить ее аналогом в электростатике?
2. Объясните явление гистерезиса ферромагнетика.
3. Что такое магнитострикция?
4. Объясните природу ферромагнетизма.
5. Какие ферромагнетики называются магнитомягкими, магнитожесткими и их области применения?

6. Каков механизм намагничения ферромагнетиков?

7. Какую температуру для ферромагнетика называют точкой Кюри?

8. Что такое ферриты, чем они отличаются от классических ферромагнетиков? Где применяются ферриты?

9. Объясните работу схемы установки, методики измерения и расчета.



**Литература:** 2. Гл. 16, §§ 135-136; 3. Гл. 24, §§ 1-5; 4. Гл. 7, §§ 1-6.

Лабораторная работа № 14  
**ИЗУЧЕНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЦЕПИ  
С ИНДУКТИВНОСТЬЮ**

**Приборы и принадлежности:** блок генераторов напряжений с наборным полем, блок мультиметров, миниблок «Трансформатор с разъемным сердечником», набор проводов, осциллограф.

**Цель работы:** исследование переходных процессов при замыкании и размыкании  $RL$ -цепи, определение постоянной времени цепи и индуктивности катушки.

**Теоретическое введение**

При замыкании и размыкании цепи, содержащей индуктивность, возникает ЭДС самоиндукции. По правилу Ленца дополнительные токи, возникающие вследствие самоиндукции, всегда направлены так, чтобы противодействовать изменениям тока в цепи. Следовательно, процесс установления тока в цепи происходит не сразу, а в течение некоторого промежутка времени.

Найдем характер изменения тока при замыкании цепи. В момент времени  $t = 0$  замкнем цепь переводом переключателя К в положение 1 (рис. 14.1). При этом ток в цепи начинает нарастать, что порождает ЭДС самоиндукции, противодействующую этому нарастанию. Согласно закону Ома

$$RI = \varepsilon + \varepsilon_c. \quad (1)$$

ЭДС самоиндукции

$$\varepsilon_c = -L \frac{dI}{dt}. \quad (2)$$

Разделяя переменные и интегрируя, получим

$$I = I_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \quad (3)$$

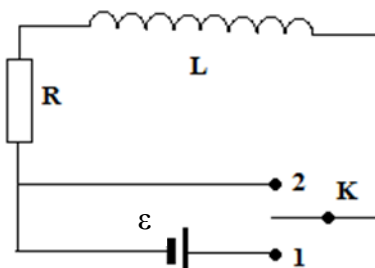


Рис. 14.1

где  $I_0 = \varepsilon/R$  – установившийся ток,  $\tau = L/R$  – постоянная времени (время релаксации).

Сила тока в цепи увеличивается от нуля до значения  $I_0 = \varepsilon/R$ , соответствующего силе постоянного тока. Зависимость силы тока при замыкании цепи от времени представлена на рис. 14.2 (кривая 1). Нарастание силы тока происходит тем быстрее,

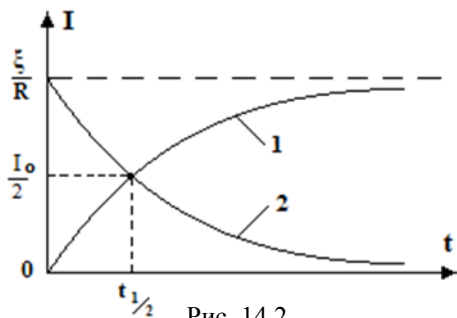


Рис. 14.2

чем больше отношение  $R/L$ , т.е. чем меньше индуктивность цепи и больше ее сопротивление.

Теперь найдем характер изменения тока при размыкании цепи. Пусть в цепь с постоянной индуктивностью и сопротивлением

включен источник тока с ЭДС, равной  $\varepsilon$ . В цепи при этом будет течь установившийся постоянный ток (внутренним сопротивлением источника пренебрегаем)

$$I_0 = \varepsilon/R. \quad (4)$$

В момент времени  $t = 0$  отключим источник, не разрывая цепь переводом переключателя К в положение 2 (рис.14.1). Как только сила тока в цепи начнет убывать, возникнет ЭДС самоиндукции, противодействующая этому убыванию. Согласно закону Ома

$$RI = \varepsilon_c, \quad (5)$$

где ЭДС самоиндукции

$$\varepsilon_c = -L \frac{dI}{dt}. \quad (6)$$

Следовательно,

$$I = -L \frac{dI}{dt}. \quad (7)$$

Решая данное дифференциальное уравнение, получим закон изменения силы тока в цепи при отключении источника

$$I = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (8)$$

где  $\tau = L/R$  – постоянная времени (время релаксации). Время релаксации – это время, в течение которого сила тока уменьшается в  $e$  раз. График зависимости силы тока в цепи от времени при отключении источника представлена на рис. 14.2 (кривая 2).

### Порядок выполнения работы с использованием осциллографа

1. Выбрать миниблок «Трансформатор с разъемным сердечником». Удалите катушку 900 витков и соберите сердечник с катушкой 300 витков, вставив между подковами сердечника с обеих сторон сложенные вдвое полоски бумаги.

2. Установить сердечник в наборное поле как показано на рис. 14.3.

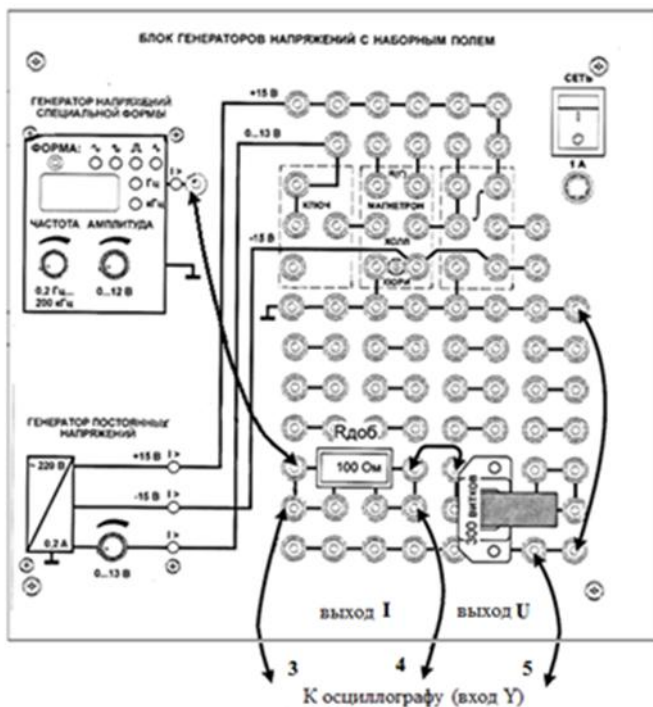


Рис. 14.3

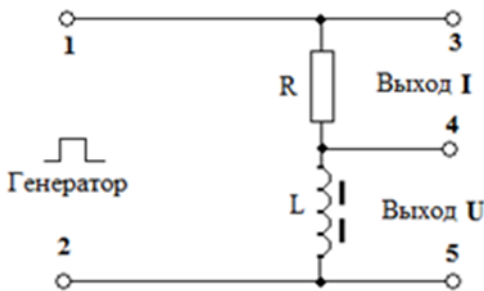


Рис. 14.4

3. Измерить омметром и записать сопротивление катушки  $R_k = \dots$  Ом.

4. Собрать на наборном поле цепь согласно рис. 14.3 и схеме рис. 14.4.

5. Подсоединить регулируемый источник напряжений специальной формы, настроенный на прямоугольные импульсы положительной полярности с параметрами:  $U_m = 10$  В,  $f = 200 \dots 250$  Гц.

6. Включить осциллограф, и используя ручки «время/дел», «V/дел», « $\leftrightarrow$ », « $\updownarrow$ » настроить его так, чтобы на экране было изображение включения и отключения катушки (рис. 14.5).

*Примечание.* Для снятия осциллограммы тока вход Y осциллографа подключается к точкам 3 и 4, а осциллограммы напряжения – к точкам 4 и 5 (рис. 14.3 и рис. 14.4).

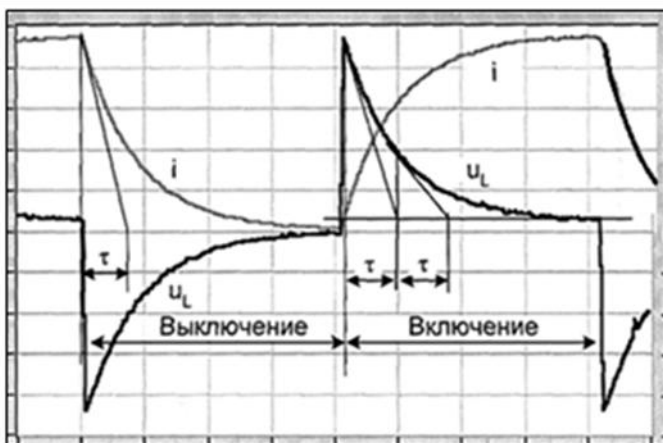


Рис. 14.5

## Порядок выполнения работы с использованием компьютера

1. Выбрать миниблок «Трансформатор с разъемным сердечником». Удалить катушку 900 витков и собрать сердечник с катушкой 300 витков, вставив между подковами сердечника с обеих сторон сложенные вдвое полоски бумаги.

2. Установить сердечник в наборное поле как показано на рис. 14.6.

3. Измерить омметром и записать сопротивление катушки  $R_k = \dots$  Ом.

4. Собрать на наборном поле цепь согласно рис. 14.6 и 14.7.

5. Подсоединить к входным зажимам регулируемый источник напряжений специальной формы, настроенный на прямоугольные импульсы положительной полярности с параметрами:  $U_m = 10$  В,  $f = 200 \dots 250$  Гц. Измерительные приборы  $A_1$  и  $V_0$  в схеме – это соответствующие пары гнезд коннектора.

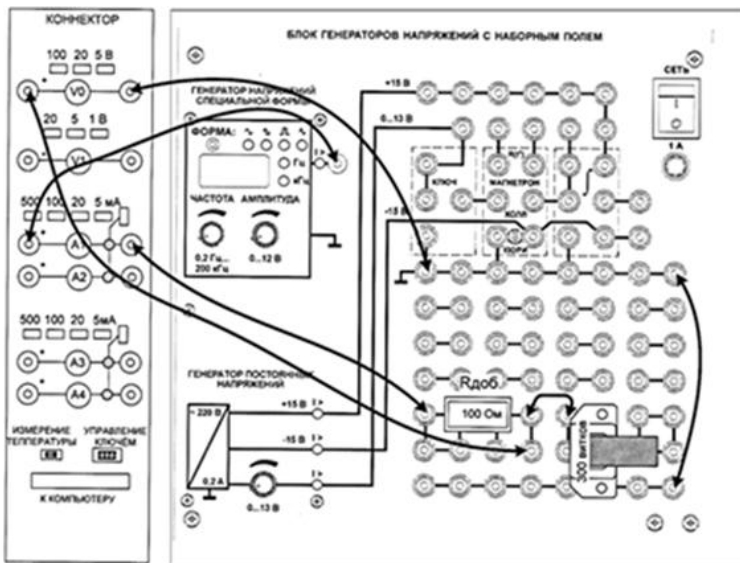


Рис. 14.6

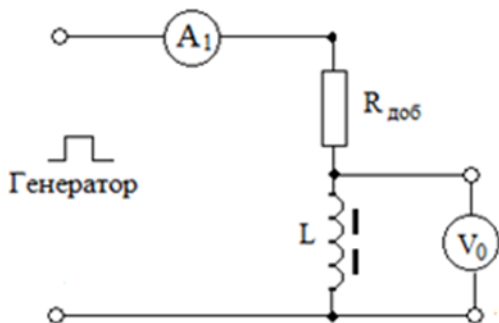


Рис. 14.7

6. Привести компьютер в рабочее состояние, «включить» виртуальный осциллограф и настроить его так, чтобы на экране было изображение процессов включения и отключения катушки (рис. 14.8).

7. Скопировать осциллограммы тока и напряжения на кальку или миллиметровую бумагу или сделать печатную копию экрана.

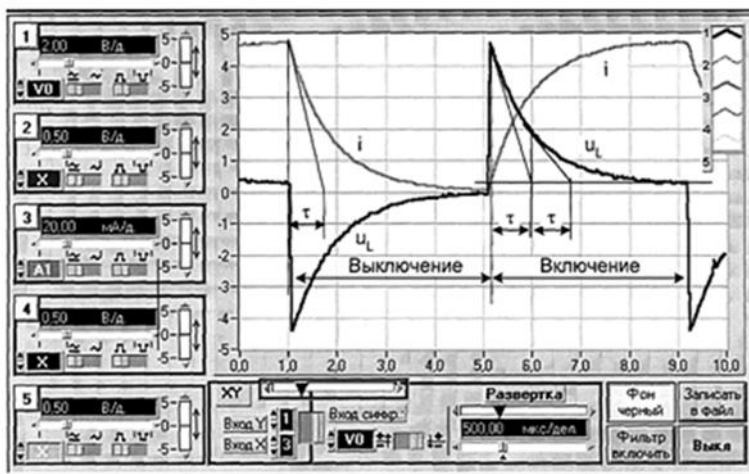


Рис. 14.8

### Обработка результатов измерений (осциллограмм)

Параметры цепи:

$R_k - \dots \text{ Ом};$

$R_{\text{доб}} = - \dots \text{ Ом};$

число витков катушки  $N_1 - 300,$

амплитуда напряжения  $U_m - 10 \text{ В}$ ,  
 частота  $f - 250 \text{ Гц}$ .

### 1. Первый способ.

На графике обозначить кривые и процессы, провести одну-две касательных к графику тока или напряжения (рис. 14.5) и по величине подкасательной определить постоянную времени.

Вычислить индуктивность катушки с сердечником из формулы для постоянной времени цепи:

$$\tau = L/R, \text{ где } R = R_k + R_{\text{доб.}}$$

откуда

$$L = \tau \cdot R = \tau \cdot (R_k + R_{\text{доб.}}) = \dots \text{ Гн.}$$

Аналогичные расчеты проделать для других  $L$  (меняется величина зазора между подковами сердечника с помощью полосок бумаги).

Сделать выводы.

### 2. Второй способ.

В данном методе для удобства измерений определяют время  $t_{1/2}$ , в течение которого ток  $I$  принимает значение, равное половине установившегося тока  $I_0$  (рис.14.2 и 14.9). Тогда из формулы (8) следует

$$e^{-\frac{R}{L}t_{1/2}} = 1/2.$$

После логарифмирования выражения получим формулу для вычисления индуктивности:

$$L = \frac{R \cdot t_{1/2}}{\ln 2}.$$

По осциллограмме определяется время, а затем вычисляется индуктивность  $L$ .

Аналогичные расчеты проделать для других  $L$  (меняется вели-

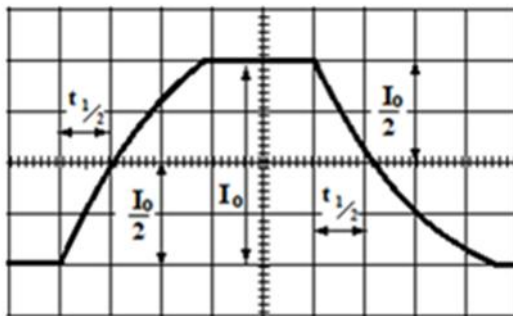


Рис. 14.9

чина зазора между подковами сердечника с помощью полосок бумаги).

Сделать выводы.

### 3. Третий способ.

По цене деления осциллографа, по току и длительности развертки определить силу тока и время.

По данным осциллографа построить график, откладывая по оси  $Oy$   $\ln \frac{I_0 - I}{I_0}$ , а по оси  $Ox$  время  $t$ , представляющий прямую линию:

$$y = -\frac{R}{L}t.$$

По углу наклона полученной прямой определить индуктивность  $L$  и время релаксации  $\tau$ .

Аналогичные расчеты проделать для других  $L$  (меняется величина зазора между подковами сердечника с помощью полосок бумаги).

Сделать выводы.

*Примечание:* выбор способа обработки осциллограммы согласовать с преподавателем.

### Контрольные вопросы

1. В чем заключается физический смысл индуктивности контура? От чего она зависит?
2. Что такое время релаксации?
3. Как изменяется ток при включении и выключении цепи, содержащей индуктивность?
4. Почему нельзя резко размыкать цепь, содержащую большую индуктивность?
5. Оцените значение ЭДС самоиндукции при выключении цепи.
6. Что такое скин-эффект?

**Литература:** 2. Гл. 15, §§ 126, 127; 3. Гл. 25, §§ 1-2; 4. Гл.8, § 6.

Лабораторная работа № 15  
**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ  
 В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ**

**Приборы и принадлежности:** блок генераторов напряжений с наборным полем, персональный компьютер с платой ввода-вывода данных, коннектор.

Вместо персонального компьютера с платой ввода-вывода данных и коннектора можно использовать осциллограф С1-112А или С1-65А.

**Цель работы:** получить затухающие электромагнитные колебания; наблюдать на экране осциллографа колебания напряжения на конденсаторе колебательного контура; исследовать влияние активного сопротивления на характер колебаний; определить период колебаний, логарифмический декремент затухания, коэффициент затухания, добротность колебательного контура.

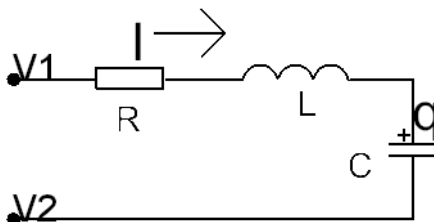


Рис. 15.1

Сравнить экспериментальные параметры затухающих колебаний с расчётными значениями.

**Теоретическое введение**

Схема колебательного контура, подсоединенного к источнику внешнего напряжения, приведена на рис.15.1.

Внешнее напряжение равно сумме напряжений на отдельных элементах:

$$U = V_1 - V_2 = U_R + U_L + U_C, \quad (1)$$

где напряжения на элементах равны

$$U_R = IR, \quad U_L = L \frac{dI}{dt}, \quad U_C = \frac{q}{C}. \quad (2)$$

Выразив силу тока  $I$  через заряд  $q$  на конденсаторе, получим:

$$I = \frac{dq}{dt}, \quad U_R = R \frac{dq}{dt}, \quad U_L = L \frac{d^2q}{dt^2}. \quad (3)$$

Подставив (2) и (3) в (1), получим дифференциальное уравнение колебаний в колебательном контуре:

$$R \frac{dq}{dt} + L \frac{d^2q}{dt^2} + \frac{q}{C} = V_1 - V_2.$$

В данной работе внешнее напряжение служит только для возбуждения затухающих колебаний в колебательном контуре. Осциллограммы снимаются в промежутках времени, когда  $V_1 - V_2 = 0$ . Дифференциальное уравнение колебаний в этом случае имеет вид:

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dq}{dt} + \frac{q}{LC} = 0. \quad (4)$$

Обозначим:  $\beta = \frac{R}{2L}$  коэффициент затухания,  $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$  частота собственных незатухающих колебаний, когда  $R=0$ . В этих обозначениях уравнение (4) записывается как:

$$\frac{d^2q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 = 0. \quad (5)$$

Вид решения этого уравнения зависит от дискриминанта:

$$D = \left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC} = \beta^2 - \omega_0^2. \quad (6)$$

Если затухание мало ( $\beta < \omega_0$ ) то дискриминант (6) отрицательный, и решением уравнений (4) и (6) являются затухающие колебания. Для напряжения на конденсаторе, пропорционального заряду  $q$ , согласно (2) решение записывается как:

$$U_C(t) = U_m e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (7)$$

где  $U_m$  – начальная амплитуда, а  $\omega$  – частота затухающих колебаний в колебательном контуре,  $\varphi_0$  – начальная фаза.

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}. \quad (8)$$

Для количественной характеристики затухания часто используют логарифмический декремент затухания, который связан с коэффициентом затухания соотношением:

$$\lambda = \beta T, \quad (9)$$

где  $T = \frac{2\pi}{\omega}$  – период затухающих колебаний. С использованием логарифмического декремента затухания формула (7) запишется как:

$$U_C(t) = U_m e^{-\frac{\lambda}{T}t} \cos(\omega t + \varphi_0). \quad (10)$$

Если затухание велико ( $\beta > \omega_0$ ), то дискриминант (6) положительный и решением уравнений (4) и (6) является спадающее с течением времени напряжение без совершения колебаний. Критическое затухание, разделяющее эти два вида процессов, равно  $\beta_{\text{крит}} = \omega_0$ .

Критическое сопротивление равно:

$$R_{\text{кр}} = 2\sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (11)$$

На рис.15.2 показаны графики изменения напряжения на конденсаторе для схемы рис.15.1 при различных сопротивлениях:  $R=2R_{\text{кр}}$ ,  $R=R_{\text{кр}}$ ,  $R=0,5R_{\text{кр}}$ ,  $R=0,1R_{\text{кр}}$ .

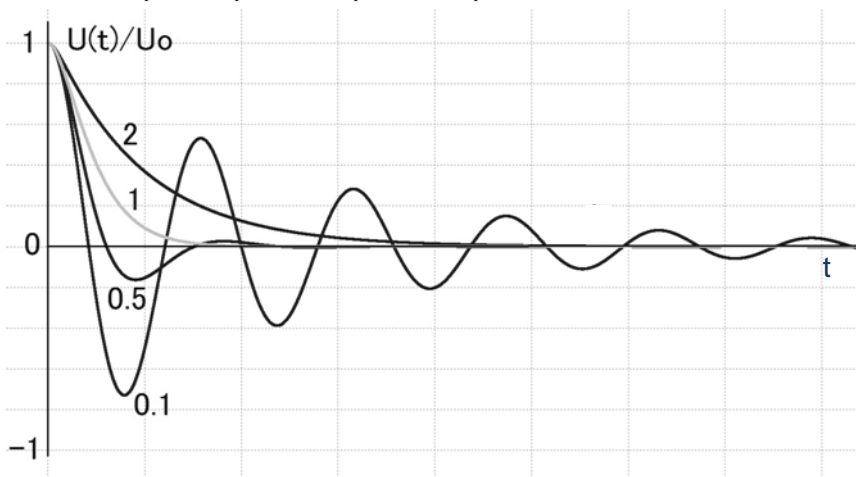


Рис. 15.2

Начальный ток катушки индуктивности равен нулю, начальное напряжение на конденсаторе на всех графиках одинаковое, неравное нулю.

### Описание экспериментальной установки

Выполнение работы при использовании персонального компьютера с платой ввода-вывода данных и коннектора.

1. Соберите цепь, принципиальная схема которой изображена на рис.15.3.

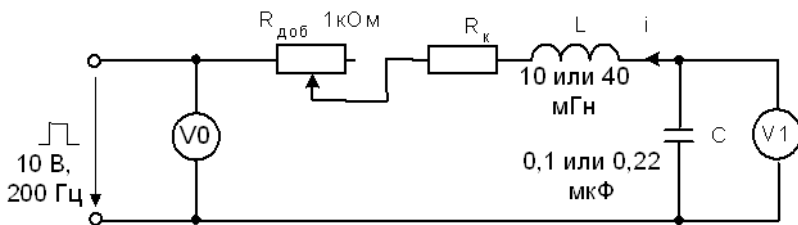


Рис. 15.3

Схема расположения элементов показана на рис. 15.4. В качестве приборов  $V_0$  и  $V_1$  использовать входы  $V_0$  и  $V_1$  коннектора, как показано на рис.15.4.

Параметры элементов цепи:

Конденсатор ёмкостью  $C = 0,22$  мкФ или  $0,47$  мкФ.

В качестве последовательно соединенных сопротивления  $R_k$  и индуктивности  $L$  следует использовать катушку индуктивно-

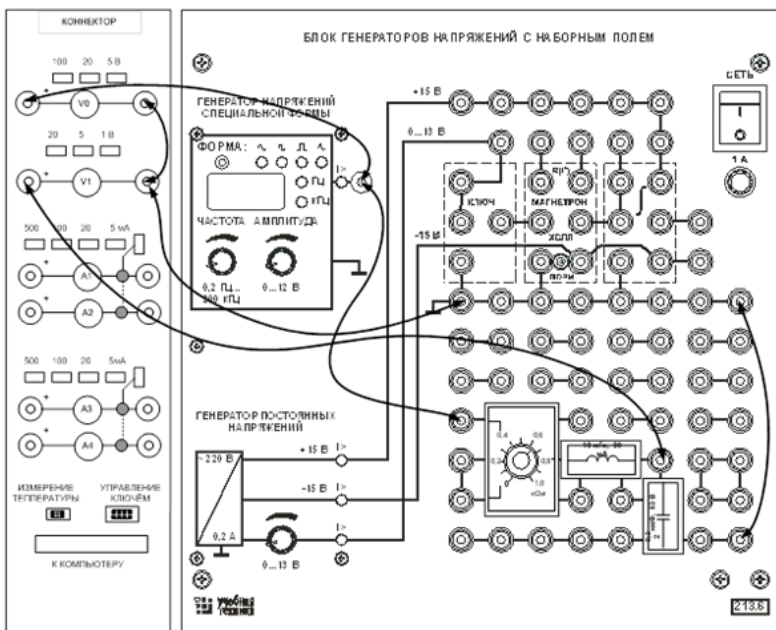


Рис. 15.4

сти 40 мГн или 100 мГн. При этом сопротивление  $R_k$  – это сопротивление обмотки катушки. Перед установкой измерьте омметром и запишите активное сопротивление катушки индуктивности  $R_k$ . Источником напряжения является генератор напряжений специальной формы. Переключателем «ФОРМА» установить на выходе генератора однополярные прямоугольные импульсы частотой 100 Гц максимальной амплитуды.

Амплитуда выходного напряжения устанавливается ручкой «АМПЛИТУДА» в пределах от 0 до 12 В. Диапазон регулирования частоты генератора напряжений специальной формы – от 0,2 Гц до 200 кГц. Частота устанавливается ручкой энкодера-потенциометра. При постоянно горящем состоянии светодиода частота меняется по декадам. При мигающем состоянии светодиода частота меняется с минимально возможным шагом. Переключение между режимами производится путем нажатия кнопки энкодера-потенциометра.

2. Выведите подстроечный резистор  $R_{доб}$  на ноль и установите на источнике напряжения однополярные прямоугольные импульсы частотой 200 Гц максимальной амплитуды.

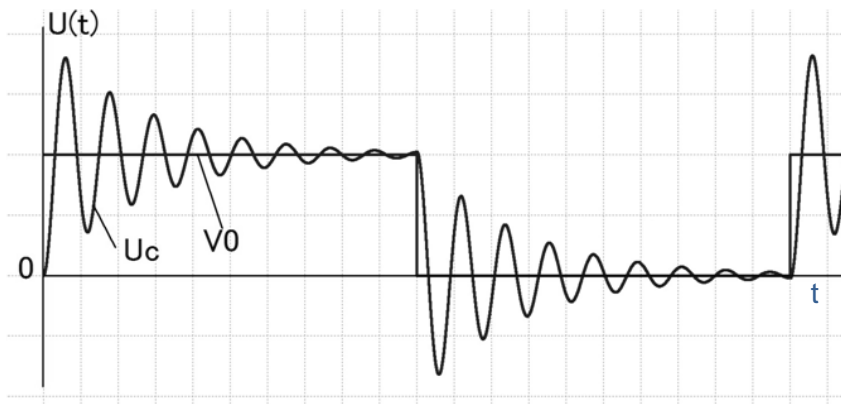


Рис. 15.5

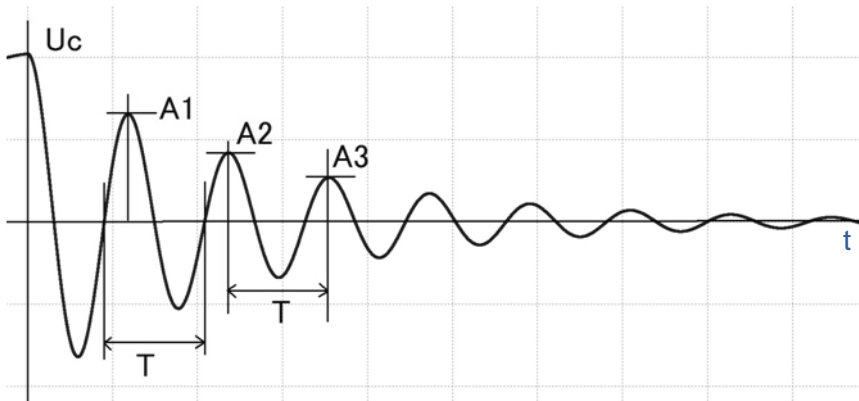


Рис. 15.6

3. Включите виртуальные приборы и настройте виртуальный осциллограф для наблюдения кривой  $U_C(t)$ . Наиболее удобная развёртка для наблюдения формы сигнала 1мс/дел. Зарисовать осциллограмму. Форма сигналов входного напряжения и напряжения на конденсаторе при различном масштабе по времени, а также схема измерений параметров сигнала показаны на рис. 15.5 и 15.6.

4. Установить развёртку 500 мкс/дел для измерений параметров сигнала. По осциллограмме определите период затухающих колебаний  $T$  и вычислите логарифмический декремент затухания  $\lambda = \ln(A_1/A_2)$ , где  $A_1$  и  $A_2$  – две соседние положительные (или отрицательные) амплитуды затухающих колебаний. Результаты занесите в строку экспериментальных данных таблицы.

Параметры	$\beta$ , 1/с	$\omega_0$ , 1/с	$\omega$ , 1/с	$T$ , мкс	$\lambda$	$R_{кр}$ , Ом
Расчётные						
Экспериментальные	-	-	-			

5. Вычислите по известным параметрам элементов схемы и занесите в строку расчётных данных таблицы следующие значения:

- затухание  $\beta = R/2L$ ,

- резонансную частоту  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ ,
- частоту затухающих колебаний  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ ,
- период затухающих колебаний  $T = 2\pi/\omega$ ,
- логарифмический декремент затухания  $\lambda = \beta T$ ,
- критическое сопротивление  $R_{кр} = 2\sqrt{L/C}$ .

6. Сравните расчётные и имеющиеся экспериментальные данные.

7. Увеличивайте добавочное сопротивление и наблюдайте за изменением параметров колебаний. Зафиксируйте момент перехода от колебательного к апериодическому (безколебательному) процессу. Измерьте омметром величину добавочного сопротивления и вычислите критическое сопротивление:  $R_{кр} = R_k + R_{доб}$ , занесите его в таблицу и сравните с имеющимся расчётным значением.

### **Выполнение работы при использовании осциллографа С1-112А**

Порядок выполнения работы при использовании осциллографа С1-112А незначительно отличается от вышеописанного.

1. Соберите цепь, принципиальная схема которой изображена на рис.15.3. Вместо прибора V1 использовать вход внешней синхронизации осциллографа. В качестве прибора V2 использовать вход Y осциллографа.

Включить питание осциллографа. Установить необходимые положения ручек управления:

- кнопку вида работы «осцил/V, kΩ» установить в положение «осцил» (нажата);

- кнопку типа входа «— ~» установить в положение «— » (отжата);

- кнопку масштаба по времени установить в положение «mS» (отжата);

- кнопку способа запуска установить в положение « $\bar{\square}$ » (отжата);

- кнопку выбора синхронизации «внутр/внеш» установить в положение «внеш» (отжата);

- кнопку «ТВ/норм» установить в положение «норм» (отжата);

- переключатель «время/дел» установить первоначально в положение 1мс, затем для измерений параметров сигнала в положение 500 мкс/дел;

- переключатель «V/дел» установить в положение 5V;

- ручку «уровень» первоначально установить вблизи среднего положения.

2. После подачи сигнала на осциллограф ручками перемещения луча и ручкой «уровень» добиться устойчивой картины, удобной для выполнения измерений.

### **Контрольные вопросы**

1. Объяснить работу колебательного контура.

2. Почему на вход подаются именно прямоугольные импульсы?

3. Как скорость затухания колебаний зависит от параметров элементов схемы?

4. Нарисовать примерные графики зависимости напряжения на конденсаторе и силы тока от времени.

5. Исходя из формулы (10) вывести формулу для вычисления логарифмического декремента затухания из пункта 4 .

6. При какой величине сопротивления быстрее всего устанавливается постоянное напряжение на конденсаторе?

7. Перечислите возможные причины затухания колебаний в реальном колебательном контуре.

**Литература:** 2. Гл. 18, § 146; 3. Гл. 28, § 1; 4. Гл.13, § 3. 5. Гл. XXI.

## **Лабораторная работа № 16 ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ И РЕЗОНАНСЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ**

**Приборы и принадлежности:** блок генераторов напряжений с наборным полем, блок мультиметров, миниблок «Трансформатор с разъемным сердечником», набор проводов.

**Цель работы:** построить резонансные кривые для последовательного и параллельного колебательного контура, определить резонансную частоту и добротность колебательного контура.

### Теоретическое введение

Синусоидальный (гармонический) переменный ток с течением времени изменяется по закону синуса или косинуса:

$$I(t) = I_m \cos(\omega t + \beta), \quad (1)$$

где  $I_m$  – амплитуда тока,  $\omega=2\pi f$  – циклическая частота колебаний тока,  $\omega t + \beta$  – фаза колебаний тока,  $\beta$  – начальная фаза тока.

Аналогично, синусоидальное переменное напряжение  $U$  (или разность потенциалов  $V$ ) изменяется по закону:

$$U(t) = U_m \cos(\omega t + \alpha), \quad V(t) = V_m \cos(\omega t + \alpha), \quad (2)$$

где  $U_m$  и  $V_m$  – амплитуды напряжения и разности потенциалов,  $(\omega t + \alpha)$  – фаза колебаний,  $\alpha$  – начальная фаза напряжения или разности потенциалов.

Электрическая цепь, имеющая два внешних вывода, называется двухполосником. К внешним выводам прикладывается разность потенциалов, которую для двухполосников часто называют (внешним) напряжением и обозначают буквой  $U$ . Для синусоидального тока двухполосник оказывает сопротивление  $Z$ , которое определяется как отношение амплитуды напряжения к амплитуде силы тока и имеет проводимость  $Y$ , которая определяется как отношение амплитуды силы тока к амплитуде напряжения:

$$Z = \frac{U_m}{I_m}, \quad Y = \frac{1}{Z} = \frac{I_m}{U_m}. \quad (3)$$

Для резисторов сопротивление синусоидальному току совпадает с их обычным омическим сопротивлением:

$$Z_R = R, \quad Y_R = 1/R.$$

Для катушки индуктивности (рис. 16.1) сопротивление можно найти из обобщённого закона Ома:

$$IR = V_1 - V_2 + \varepsilon, \quad (4)$$

где  $R$  – омическое сопротивление участка цепи,  $U=V = V_1 - V_2$  – разность потенциалов на концах участка цепи,  $\varepsilon$  – ЭДС на участке цепи.

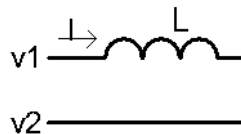


Рис. 16.1

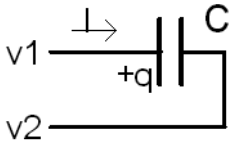
пи. В данном случае  $R = 0$ ,  $\varepsilon = -L di/dt$  — это ЭДС самоиндукции, возникающая при изменении силы тока через катушку с индуктивностью  $L$ . Подставляя в (4) выражение (1) для тока и используя (3), получим:

$$U = -\varepsilon = L \frac{di}{dt} = -L\omega I_m \sin(\omega t + \beta) = L\omega I_m \cos\left(\omega t + \beta + \frac{\pi}{2}\right),$$

$$Z_L = \omega L, \quad Y_L = \frac{1}{\omega L}.$$

Слагаемое  $\pi/2$  в выражении для  $U$  указывает на то, что колебания напряжения на катушке индуктивности опережают колебания силы тока по фазе на  $\pi/2 = 90^\circ$ .

Для конденсатора (рис.16.2) сопротивление переменному току можно найти, выразив ток, протекающий через конденсатор, через разность потенциалов (2):



$$I = \frac{dq}{dt} = C \frac{dU}{dt} = -C\omega U_m \sin(\omega t + \alpha) = C\omega U_m \cos\left(\omega t + \alpha + \frac{\pi}{2}\right),$$

$$Y_C = \omega C, \quad Z_C = \frac{1}{\omega C}.$$

Рис. 16.2

Слагаемое  $\pi/2$  в выражении для тока  $I$  указывает на то, что колебания тока в конденсаторе опережают колебания напряжения по фазе на  $\pi/2 = 90^\circ$ , а колебания напряжения, соответственно, отстают от колебаний силы тока по фазе на  $\pi/2$ .

Поскольку для конденсатора и катушки индуктивности ток и напряжение отличаются по фазе на  $90^\circ$ , средняя за период колебаний мощность в этих элементах равна нулю. Поэтому индуктивное и ёмкостное сопротивления переменному току называют реактивными в отличие от активного сопротивления резистора.

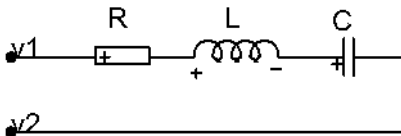


Рис. 16.3

При последовательном соединении двухполюсников складываются напряжения на них.

Напряжение на последовательном колебательном контуре (рис. 16.3), состоящем из последовательно

соединённых резистора, катушки индуктивности и конденсатора, при протекании тока (1) равно:

$$U = U_R + U_L + U_C = I_m R \cos(\omega t + \beta) + I_m \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \sin(\omega t + \beta),$$

$$U = I_m Z \cos(\omega t + \beta + \varphi).$$

Общее сопротивление  $Z$  последовательного колебательного контура равно:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}. \quad (5)$$

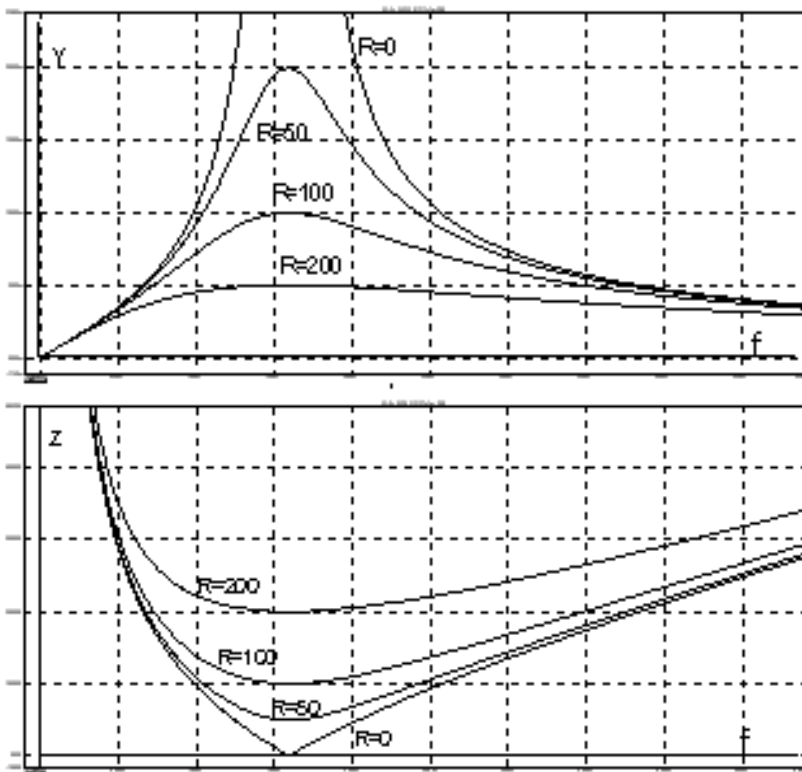


Рис. 16.4

Колебания напряжения опережают колебания силы тока по фазе на величину  $\varphi$ , определяемую из условия:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{\omega L - 1/\omega C}{R}. \quad (6)$$

Сопротивление имеет минимальное значение, а проводимость максимальна (рис. 16.4) на резонансной частоте  $\omega = \omega_0$ , определяемой из условия:

$$\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0, \quad \omega_0 = 1/\sqrt{LC} \quad (7)$$

При отсутствии в цепи активного сопротивления  $R$  сопротивление  $Z$  на резонансной частоте равно нулю. При этом напряжения на катушке и конденсаторе не равны нулю, они имеют одинаковую абсолютную величину, но противоположные знаки и полностью компенсируют друг друга (резонанс напряжений), и ток по этой цепи протекает при нулевом напряжении на её концах.

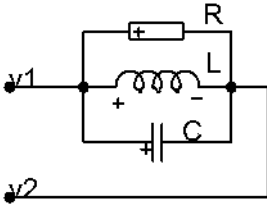


Рис. 16.5

При параллельном соединении двухполюсников складываются токи. Ток через параллельный колебательный контур (рис.16.5), состоящий из параллельно соединённых резистора, катушки индуктивности и конденсатора, при приложении напряжения (2) равен:

$$I = I_R + I_L + I_C = U_m \cos(\omega t + \beta)/R + U_m \sin(\omega t + \beta)/(\omega C - 1/\omega L).$$

$$I = U_m Y \cos(\omega t + \beta - \varphi), \quad U = I_m Z \cos(\omega t + \alpha + \varphi).$$

Общее сопротивление параллельного колебательного контура равно

$$Z = \frac{1}{\sqrt{1/R^2 + (\omega C - 1/\omega L)^2}}. \quad (8)$$

Колебания напряжения опережают колебания силы тока по фазе на величину  $\varphi$ , определяемую из условия:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{R}{1/\omega L - \omega C} \quad (9)$$

Общее сопротивление имеет максимальное значение на резонансной частоте  $\omega_0$  (7).

При отсутствии в цепи активного сопротивления  $R$  сопротивление  $Z$  на резонансной частоте бесконечно, и суммарный ток по этой цепи равен нулю. При этом токи через катушку и конденсатор не равны нулю, они имеют одинаковую абсолют-

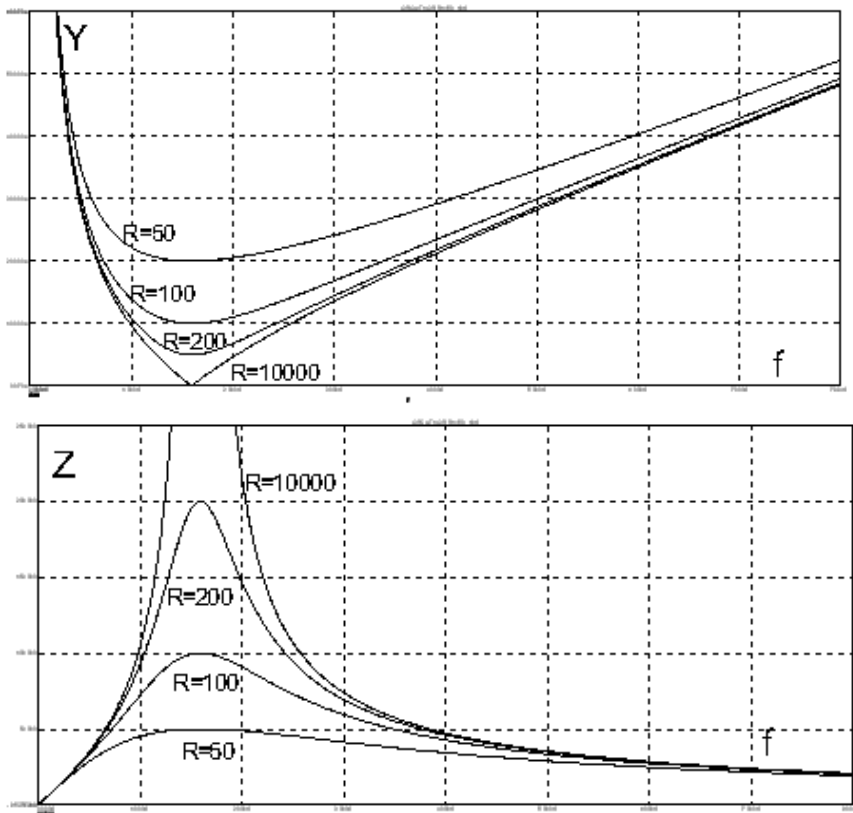


Рис. 16.6

ную величину, но противоположные знаки полностью компенсируют друг друга (резонанс токов).

Графики зависимости модуля проводимости  $Y$  и модуля сопротивления  $Z$  параллельного колебательного контура от частоты  $f$  приведены на рис.16.6 и аналогичны приведённым на рис. 16.4, но  $Y$  и  $Z$  поменяются местами. Для характеристики относительной ширины резонансных кри-

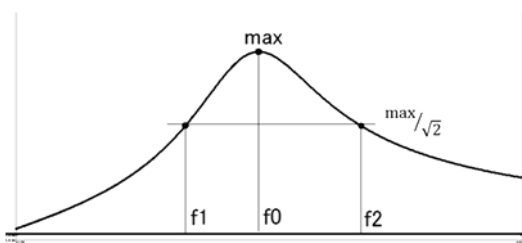


Рис. 16.7

вых используется добротность  $Q$ , которая определяется как отношение частоты  $f_0$  её максимума к ширине  $f_2-f_1$  на уровне  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  от максимума:

$$Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1}. \quad (9)$$

### Описание экспериментальной установки

Принципиальная схема экспериментальной установки показана на рис. 16.8 и 16.9.

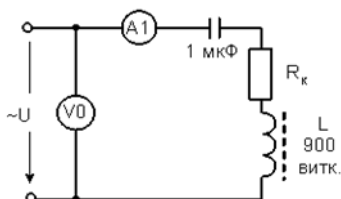


Рис. 16.8

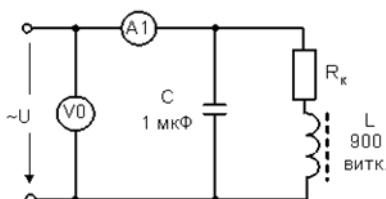


Рис. 16.9

Параметры элементов цепи: конденсатор ёмкостью  $C = 1$  мкФ.

В качестве последовательно соединенных сопротивления  $R_k$  и индуктивности  $L$  следует использовать катушку 900 витков с одной половинкой разъёмного сердечника.

При этом сопротивление  $R_k$  – это сопротивление обмотки катушки.

В качестве вольтметра  $V0$  необходимо использовать мультиметр МУ62, а в качестве амперметра  $A0$  – мультиметр МУ60. *Мультиметр МУ60 по сравнению с МУ62 имеет большие пределы измерения тока и, что особенно важно, – большую перегрузочную способность по току. Поэтому для измерения токов предпочтительно использовать именно прибор МУ60!* Рекомендуемые пределы измерения вольтметра и амперметра соответственно 2 В переменного напряжения и 200 мА переменного тока.

Источником переменного напряжения является генератор напряжений специальной формы. Переключателем «ФОРМА» установить синусоидальное напряжение. Амплитуда выходного напряжения устанавливается ручкой «АМПЛИТУДА» в пределах от 0 до 12 В. Диапазон регулирования частоты генератора

напряжений специальной формы – от 0,2 Гц до 200 кГц. Частота устанавливается ручкой энкодера-потенциометра. При постоянно горящем состоянии светодиода частота меняется по декадам. При мигающем состоянии светодиода частота меняется с минимально возможным шагом. Переключение между режимами производится путем нажатия кнопки энкодера-потенциометра.

1. Соберите на наборном поле цепь по схеме рис.16.8.

2. Включите мультиметры, установите амплитуду переменного синусоидального напряжения генератора равной 1В. Регулируя частоту, добейтесь резонанса, на что укажет максимум тока. Изменяя частоту вниз и вверх от резонансной, снимите зависимость тока от частоты. Диапазон частот ориентировочно равен 0,3...2 кГц.

3. Шаг по частоте при измерениях выбирать так, чтобы показания от точки к точке менялись не слишком сильно и по этим точкам можно было построить плавную кривую. По мере удаления от резонанса шаг по частоте можно увеличить. Результаты запишите в таблицу.

4. Соберите на наборном поле цепь по схеме рис.16.9.

5. Повторите измерения для параллельного резонансного контура. В этом случае резонансу соответствует минимум силы тока.

6. Для каждой схемы постройте графики зависимости модуля комплексного сопротивления  $Z = V/I$  от частоты и определите резонансные частоты  $f_0$  для каждого колебательного контура. По графику для последовательного колебательного контура определить две частоты  $f_1$  и  $f_2$ , на которых  $Z$  увеличивается в  $\sqrt{2}$  по сравнению с минимальным значением. По графику для параллельного колебательного контура определить две частоты  $f_1$  и  $f_2$ , на которых  $Z$  уменьшается в  $\sqrt{2}$  по сравнению с максимальным значением. Рассчитайте добротность каждого колебательного контура:  $Q = f_0/(f_2-f_1)$ .

8. Используя значения ёмкости конденсатора и измеренное значение резонансной частоты для последовательного колебательного контура, по формуле (7) рассчитайте индуктивность катушки.

Результаты всех измерений заносите в табл. 1 и 2.

Таблица 1

## Последовательный колебательный контур

$f$ , кГц	$V$ , В	$I$ , мА	$Z$ , Ом

Таблица 2

## Параллельный колебательный контур

$f$ , кГц	$V$ , В	$I$ , мА	$Z$ , Ом

**Контрольные вопросы**

1. Что такое резонанс напряжений, при каких условиях он возникает?
2. Что такое резонанс токов, при каких условиях он возникает?
3. Чему равны сопротивление и проводимость электрической цепи при возникновении резонанса напряжений, резонанса токов, если активное сопротивление цепи равно нулю?
4. Нарисовать примерные графики зависимости сопротивления и проводимости от частоты для конденсатора.
5. Нарисовать примерные графики зависимости сопротивления и проводимости от частоты для катушки индуктивности.
6. На некоторой частоте модули сопротивлений конденсатора ёмкостью  $C$  и катушки с индуктивностью  $L$  одинаковы. Найти эти сопротивления. Чем они отличаются? Чему будет равно общее сопротивление при их параллельном или последовательном соединении?
7. Как зависит добротность последовательного колебательного контура от величины сопротивления резистора?
8. Почему графики резонансных кривых несимметричны?

**Литература:** 2. Гл. 18, §§ 149-151; 3. Гл. 28, § 3; 4. Гл. 13, § 4. 5. Гл. XXI.

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беглецов Н.Н., Красногорцев И.Л. Электричество и магнетизм. Руководство по выполнению базовых экспериментов. ЭМФ.001 РБЭ (910) – Челябинск: ООО «Учебная техника», 2003. – 85 с.

2. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. – 16-е изд., стер. – М.: Академия, 2008. – 560 с.

3. Детлаф А. А. Курс физики: учеб. пособие для втузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – 4-е изд., испр. – М.: Академия, 2003. – 720 с.

4. Савельев И. В. Курс общей физики: учеб. пособие: в 5 кн. Кн.4: Электричество и магнетизм/ И. В Савельев. – М.: Астрель, АСТ, 2003. – 336 с.

5. Калашников С.Г. Электричество: учеб. пособие/ С.Г. Калашников – 5-е изд., испр. и доп. – М.: Наука, 1985. – 576 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Общие методические указания и требования к выполнению лабораторных работ</b> .....	3
<b>Лабораторная работа № 1.</b> Моделирование плоскостатического электростатического поля током в проводящем листе.....	4
<b>Лабораторная работа № 2.</b> Поляризация характеристика сегнетоэлектрика и её зависимость от температуры .....	9
<b>Лабораторная работа № 3.</b> Измерение заряда и определение емкости конденсатора .....	18
<b>Лабораторная работа № 4.</b> Процессы заряда и разряда конденсатора, определение постоянной времени .....	22
<b>Лабораторная работа № 5.</b> Измерение сопротивлений и определение удельного сопротивления проводника .....	27
<b>Лабораторная работа № 6.</b> Определение температурного коэффициента сопротивления проводника и ширины запрещенной зоны полупроводника .....	33
<b>Лабораторная работа № 7.</b> Изучение эффекта Холла в полупроводниках .....	39
<b>Лабораторная работа № 8.</b> Определение удельного заряда электрона методом магнетрона .....	43
<b>Лабораторная работа № 9.</b> Исследование магнитного поля на оси кольцевых катушек .....	49
<b>Лабораторная работа № 10.</b> Исследование магнитного поля на оси цилиндрической катушки.....	54
<b>Лабораторная работа № 11.</b> Определение параметров индуктивно связанных катушек .....	57
<b>Лабораторная работа № 12.</b> Снятие основной кривой намагничивания ферромагнетика и определение магнитной проницаемости .....	63
<b>Лабораторная работа № 13.</b> Снятие петли гистерезиса, определение точки Кюри и намагниченности насыщения ферромагнетика .....	72
<b>Лабораторная работа № 14.</b> Изучение переходных процессов в цепи с индуктивностью .....	81
<b>Лабораторная работа № 15.</b> Исследование затухающих колебаний в электрических цепях .....	89
<b>Лабораторная работа № 16.</b> Вынужденные колебания и резонансы в электрических цепях .....	96
<b>Список рекомендуемой литературы</b> .....	105

*Учебно-практическое издание*

**Алексеев** Владимир Германович  
**Иванов** Анатолий Леонидович  
**Казаков** Сергей Михайлович и др.

## **ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ**

### **Лабораторный практикум**

Редактор А.Н. Антонова  
Компьютерная верстка и правка И.Г. Александрова

Согласно Закону №436-ФЗ от 29 декабря 2010 года  
данная продукция не подлежит маркировке

Подписано в печать 25.12.15. Формат 60×84/16.  
Бумага газетная. Гарнитура Times. Печать оперативная.  
Усл. печ.л. Уч.-изд. л. Тираж 200 экз. Заказ №1386

Издательство Чувашского университета  
Типография университета  
428015 Чебоксары, Московский просп., 15