

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ**  
**Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского**  
**«Харьковский авиационный институт»**

**И.В. Лунев, Д.А. Воронович, В.Ю. Гресь,**  
**О.В. Подшивалова**

## **ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ**

**Учебное пособие**  
**по лабораторному практикуму**

**Харьков «ХАИ» 2008**

УДК 53 (076.5)

Электричество и магнетизм / И.В. Лунев, Д.А. Воронович, В.Ю. Гресь, О.В. Подшивалова. – Учеб. пособие по лабораторному практикуму. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2008.– 169 с.

Приведено описание предусмотренных учебной программой лабораторных работ, которые выполняются при изучении курса физики по разделу «Электричество и магнетизм». Каждая лабораторная работа содержит перечень требуемых приборов и принадлежностей, необходимые теоретические сведения, касающиеся методики эксперимента, описание лабораторной установки, порядок выполнения работ и контрольные вопросы для самопроверки.

Для студентов технических вузов.

Ил. 67. Табл. 29. Библиогр.: 12 назв.

Рецензенты: д-р физ.-мат. наук, проф. А.И. Пятак,  
канд. физ.-мат. наук, доц. Д.Н. Степаненко

© Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского  
«Харьковский авиационный институт», 2008 г.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Данное издание включает в себя описание всех лабораторных работ, которые выполняются на лабораторном практикуме кафедры физики. Часть этих работ поставлены в 60–90-е годы XX века старшим поколением преподавателей: А.Л. Рвачевым, Г.Д. Никишовой, В.Г. Падалкой, О.М. Либиной, И.Я. Минцем, Е.И. Тищенко, Л.С. Жилиной, Г.С. Тохтамышевой и др. Содержание предлагаемых лабораторных работ охватывает все разделы по теме «Электромагнетизм» курса «Общая физика». Среди них: электростатика, постоянный ток, магнитное поле постоянных токов, движение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях, явления электромагнитной индукции и самоиндукции, электромагнитные колебания и волны. В основе описания лабораторных работ лежат предыдущие издания пособий по данной тематике, в которых принимали участие И.Г. Гаврикова, Н.И. Глущенко, Н.Н. Жуков, А.П. Кислицин, В.П. Мигаль, Т.С. Михайловская, О.И. Петрова, А.В. Попов, Е.П. Скидан, А.А. Таран, О.Н. Чугай. В предлагаемом пособии описания большинства работ существенно переработаны, исправлены допущенные ранее ошибки, расширен и систематизирован круг вопросов для самопроверки.

Над пособием работали: И.В. Лунев (лабораторные работы № 2-08 – 2-10, 2-12, 2-13, 2-15, 2-18); Д.А. Воронович (лабораторные работы № 2-20 – 2-24); В.Ю. Гресь (вводная статья «Электрические измерения и приборы» и лабораторные работы № 2-04, 2-11, 2-14, 2-16, 2-17, 2-19); О.В. Подшивалова (лабораторные работы № 2-01 – 2-03, 2-05 – 2-07).

При подготовке к выполнению работ студентам следует пользоваться литературой, указанной в библиографическом списке.

Авторы будут благодарны за замечания и пожелания, высказанные по поводу содержания и оформления данного учебного пособия.

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ

## 1. Классификация электроизмерительных приборов

При проведении физических экспериментов важнейшее значение имеют правильно выполненные измерения. Получение достаточно надежных данных зависит от приборов, способов измерения и учета погрешностей. Большая часть измерений как электрических, так и неэлектрических величин в настоящее время производится с помощью электроизмерительных приборов.

Электрическое измерение – это сравнение электрической величины с ее эталоном. Измерения могут быть произведены различными способами в зависимости от характера измеряемой величины, требуемой точности и т. д. Измерения бывают *прямыми*, когда измерительный прибор показывает непосредственно числовое значение измеряемой величины, и *косвенными*, когда результат получается после подстановки в формулу величин, полученных при прямых измерениях. Измерения с помощью градуированных приборов носят название *метода непосредственной оценки*.

Электроизмерительные приборы классифицируются по ряду признаков:

- 1) по виду измеряемой величины – амперметры, вольтметры, омметры, мосты для измерения сопротивления, емкости, индуктивности;
- 2) по принципу действия (по измерительной системе) – электромагнитные, магнитоэлектрические, электродинамические, электронные, индукционные, электростатические и др.;
- 3) по степени точности (классу точности);
- 4) по способу защиты от влияния внешних магнитных или электрических полей – экранированные, неэкранированные;
- 5) по способу отсчета – стрелочные, цифровые;
- 6) по предъявляемым в эксплуатации особым требованиям – пылеводонепроницаемые, взрывобезопасные и др.

## 2. Основные параметры электроизмерительных приборов. Погрешность приборов

Несмотря на то, что приборы различных систем существенно отличаются друг от друга, имеется целый ряд деталей и узлов, общих для всех электроизмерительных приборов. Для защиты измерительного механизма от механических воздействий, пыли, влаги служит корпус, выполненный обычно из пластмассы. На шкалу прибора наносятся (рис. 1) наименование прибора, условные обозначения системы прибора, класса точности, степени защищенности от магнитных или электрических полей; указываются испытанное напряжение изоляции измерительной цепи по отношению к корпусу, род тока (постоянный, переменный) и число фаз, год выпуска и заводской номер. Шкала прибора градуируется – около некоторых делений шкалы наносятся цифры, показывающие числовое значение измеряемой величины. Разность значений величины, соответствующих двум соседним делениям, называется ценой деления. Если  $N_1$  и  $N_2$  – указанные на шкале числовые зна-

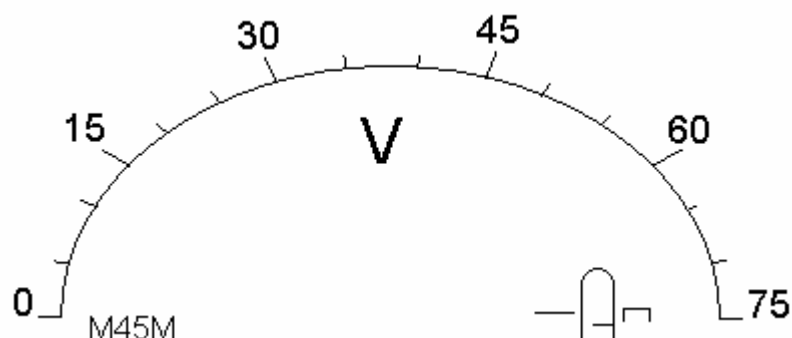


Рис. 1

чения измеряемой величины, а  $n$  – число делений между ними, то *цена деления* определяется по формуле

$$C = \frac{N_1 - N_2}{n}. \quad (1)$$

*Пример.* Шкала вольтметра состоит из 75 делений, номинальное значение шкалы (верхний предел измерений) составляет 300 В.

Цена деления вольтметра  $C = \frac{300}{75} = 4$  В/дел.

Погрешность показаний прибора является его важной характеристикой и определяет степень приближения показаний прибора к действительному значению измеряемой величины.

Абсолютная погрешность прибора

$$\Delta A = |A_1 - A|, \quad (2)$$

где  $A_1$  – показание прибора;  $A$  – действительное значение измеряемой величины.

Относительная погрешность прибора

$$\gamma = \frac{\Delta A}{A} 100 \% . \quad (3)$$

Приведенная относительная погрешность прибора

$$\gamma_n = \frac{\Delta A}{A_n} 100 \% , \quad (4)$$

где  $A_n$  – номинальное (максимальное) значение измеряемой величины. Поскольку величина относительной погрешности тем больше, чем меньше значение измеряемой величины, на шкале измерительного прибора указана его приведенная относительная погрешность.

По степени точности приборы разделяются на 8 классов точности: 0,05; 0,01; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5; 4,0. *Класс точности* определяет приведенную относительную погрешность данного прибора. По классу точности можно определить максимально допустимую абсолютную погрешность.

*Пример.* Показание амперметра  $I_1 = 1$  А, номинальное значение шкалы  $I_n = 5$  А, класс точности  $\gamma_n = 1,0$ . Согласно (4) абсолютная погрешность прибора  $\Delta I = \frac{\gamma_n I_n}{100} = \frac{1,0 \times 5}{100} = 0,05$  А. Зная

абсолютную погрешность, действительное значение измеряемой величины можно записать в виде  $I = I_1 + \Delta I$ ; в нашем примере  $I = (1 \pm 0,05)$  А.

Важной характеристикой прибора является его *чувствительность* к измеряемой величине. *Чувствительностью* прибора  $S$  называется производная от перемещения указателя прибора по измеряемой величине  $A$ . Для приборов с угловым перемещением стрелки

$$S = \frac{d\alpha}{dA}. \quad (5)$$

Цена деления и чувствительность прибора связаны соотношением

$$C = \frac{1}{S} = \frac{dA}{d\alpha}. \quad (6)$$

Следует знать, что наряду с приборами, в которых применяются стрелочные показатели, у приборов высокой чувствительности (например гальванометров) роль стрелки выполняет световой луч. На подвижной части прибора укрепляют зеркальце. От осветителя свет направляется на зеркальце и, отразившись от него, падает на шкалу, в результате чего на шкале получается световой блик («зайчик»). Световой указатель позволяет значительно повысить чувствительность прибора.

Основным элементом измерительного прибора является механизм, в котором электрическая энергия преобразуется в механическую. Под действием последней происходит отклонение подвижной части механизма с указателем (стрелкой). Рассмотрим возникающие при этом моменты – вращающий и противодействующий. Возникающий в процессе измерений определенной величины вращающий момент  $M$  поворачивает подвижную часть прибора в сторону возрастающих показаний. Момент  $M$  однозначно определяется измеряемой величиной  $A$  и зависит от угла поворота  $\alpha$  подвижной части:

$$M = f(A, \alpha).$$

Для того чтобы угол отклонения  $\alpha$  зависел от измеряемой величины, в приборе при повороте подвижной части создается противодействующий момент  $M_\alpha$ , направленный навстречу вращающему моменту и зависящий от угла поворота  $\alpha$ . Обычно  $M_\alpha$  создается с помощью упругих элементов (спиральных пружинок или тонких нитей – растяжек и подвесок), которые при повороте подвижной части закручиваются. Противодействующий момент

$$M_\alpha = D\alpha,$$

где  $D$  определяется упругими свойствами пружины (подвеса). При установившемся положении указателя вращающий и противодействующий моменты равны:  $M = M_{\alpha}$ .

В зависимости от принципа действия измерительных приборов их шкалы могут быть равномерными и неравномерными. Шкала равномерная, если вращающий момент прямо пропорционален измеряемой величине, а противодействующий – углу поворота подвижной части. Когда эти зависимости носят степенной, логарифмический или другой сложный характер, шкала прибора является неравномерной.

Противодействующий момент после выключения прибора возвращает подвижную часть прибора в исходное положение. В отсутствие противодействующего момента при измерении стрелка прибора отклоняется на всю шкалу и не имеет определенного нулевого положения. В высокочувствительных приборах растяжки и подвесы используются не только для создания противодействующего момента, но и для крепления подвижной части и подвода к ней тока. Подвижная часть прибора из-за наличия упругой силы противодействия и сил трения совершает затухающие колебания. Для сокращения времени установления стрелки в исходное положение применяются успокоители. В приборах чаще всего используются успокоители двух видов: воздушные и магнитоиндукционные.



## Лабораторная работа № 2-01

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ МЕТОДОМ МОДЕЛИРОВАНИЯ

*Цель работы* – исследование электростатического поля, создаваемого электродами различной формы; построение эквипотенциальных поверхностей и линий напряженности электростатического поля.

*Приборы и оборудование:* электролитическая ванна с электродами различной формы и координатной сеткой; осциллограф; вольтметр; микроамперметр; зонды; источник переменного напряжения.

### Изучение лабораторной установки и методики измерений

Электростатическое поле характеризуется в каждой точке пространства вектором напряженности электрического поля  $\vec{E}$  и потенциалом  $\varphi$ , которые связаны друг с другом соотношением

$$\vec{E}(x, y, z) = -\text{grad}\varphi. \quad (1.1)$$

Это поле графически изображается с помощью линий напряженности  $\vec{E}$  (силовых линий) и эквипотенциальных линий. Так как линии напряженности и эквипотенциальные линии взаимно перпендикулярны, то электростатическое поле можно изображать с помощью только силовых или эквипотенциальных линий.

В данной работе для исследования расположения силовых и эквипотенциальных линий используется метод моделирования поля с помощью электролитической ванны. Этот метод основан на подобии полей в вакууме и однородном электролите, создаваемых одной и той же системой зарядов. В отличие от вакуума или диэлектрика в электролите присутствуют носители тока, поэтому необходимо использовать источник тока для поддержания постоянных потенциалов на электродах. Под действием исследуемого электрического поля свободные носители создают электрический ток, плотность которого, в соответствии с законом Ома,

$$\vec{j}(x, y, z) = \sigma \vec{E}(x, y, z), \quad (1.2)$$

где  $\sigma$  – удельная электрическая проводимость электролита.

Плотность тока в каждой точке электролита пропорциональна напряженности поля  $\vec{E}$ , поэтому в ванне (при условии однородности электролита) формируется поле плотности токов (распределение в пространстве плотности тока  $\vec{j} = \vec{j}(x, y, z)$ ), подобное электрическому полю. Исследовать поле плотности токов гораздо легче, чем электрическое поле в вакууме. Вид линий тока можно определить, измеряя силы токов, которые проходят через некоторую плоскую площадку (небольшой плоский зонд), помещаемую в различные точки электролита.

Распределение потенциалов можно найти, вводя в электролит цилиндрический металлический электрод (зонд), при этом потенциал зонда становится равным потенциалу той точки поля, в которой он находится. Надо учитывать, что электрическая цепь зонда должна иметь большее сопротивление по сравнению с сопротивлением между точками в электролите, а сам зонд должен иметь небольшие размеры по сравнению с электродами, в противном случае внесение зонда исказит поле.

В целях предотвращения поляризации электролита используется источник переменного напряжения частотой 50 Гц. При такой частоте распределение токов в электролитической ванне можно рассматривать как постоянное в данный момент времени (квазистационарное).

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.1. В диэлектрическую ванну, заполненную электролитом (водой), помещены металлические электроды Э. Источником питания ИП создается заданная разность потенциалов на электродах, поле между которыми требуется исследовать.

Положение эквипотенциальных линий определяется с помощью цилиндрического зонда  $Z_1$ . На вход осциллографа (при выключенной горизонтальной развертке) подается сигнал, равный разности потенциалов между подвижным контактом потенциометра  $R$  и зондом  $Z_1$ . На экране осциллографа появляется вертикальная линия, длина которой пропорциональна этой разности потенциалов. Если разность потенциалов между зондом и подвижным контактом потенциометра равняется нулю, то на экране наблюдается

светящаяся точка. Изменяя положение зонда  $Z_1$ , можно найти точки в ванне, в которых потенциал равен потенциалу подвижного контакта потенциометра  $R$ . Эти точки лежат на эквипотенциальной линии исследуемого поля. Потенциал поля на этой линии определяется вольтметром  $V$ . Изменяя положение подвижного контакта потенциометра  $R$ , можно определить положения эквипотенциальных линий, которые имеют различные потенциалы.

Расположение силовых линий поля, которые совпадают с линиями плотности тока, определяется с помощью плоского зонда  $Z_2$  и микроамперметра. Зонд  $Z_2$  состоит из двух металлических пластин, разделенных слоем диэлектрика, которые соединены через микроамперметр (рис. 1.1). Чтобы ток между пластинами шел через микроамперметр, а не через электролит, его сопротивление

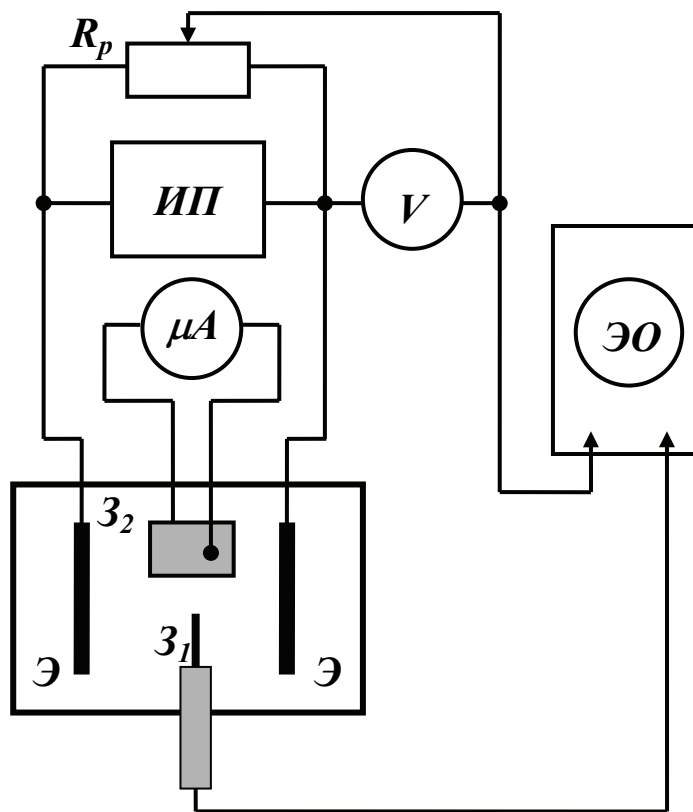


Рис. 1.1

должно быть значительно меньше сопротивления между точками в электролите, в которых находятся пластины. Если пластины расположены параллельно линиям плотности тока (линии тока не

проходят через пластины), то через микроамперметр ток не идет. В этом случае линии тока и, соответственно, линии напряженности электрического поля параллельны плоскости пластин. Поворачивая зонд относительно вертикальной оси, можно добиться, чтобы протекающий через амперметр ток был максимальным. В этом случае плоскость пластин будет перпендикулярна линиям плотности тока и, соответственно, линиям напряженности.

### **Порядок выполнения работы**

#### *Задание 1. Построение эквипотенциальных линий*

1. На миллиметровой бумаге (сохраняя масштаб) нарисовать систему электродов (форма используемых электродов задается преподавателем).
2. Заполнить ванночку водой так, чтобы пластина с координатной сеткой и электродами была погружена в воду на глубину 5...10 мм. Включить источник питания.
3. Включить осциллограф и дать ему прогреться в течение 2–3 мин. Отключив развертку по горизонтали, ручками управления добиться того, чтобы электронный луч попадал в центр экрана.
4. Определить потенциалы электродов, которые задаются источником питания. Для этого необходимо ручку регулировки потенциометра  $R$  установить в крайнее левое положение и дотронуться зондом  $Z_1$  до одного из электродов. При этом на экране осциллографа будет линия или точка. Если на экране осциллографа будет точка, то потенциал зонда равен нулю (отклонение стрелки вольтметра отсутствует). Если на экране осциллографа будет линия, то потенциал электрода отличен от нуля. Чтобы определить потенциал этого электрода, надо, не отрывая зонд от электрода, вращать ручку потенциометра до тех пор, пока линия на экране не превратится в точку. При этом вольтметр покажет потенциал данного электрода.
5. Ручкой регулировки потенциометра установить напряжение на вольтметре 2 В. Перемещая зонд  $Z_1$  по дну ванны, найти положение, в котором вертикальная линия на экране осциллографа превратилась в точку. Это положение зонда, определяемое по

координатной сетке, отметить на миллиметровой бумаге с изображением электродов. Перемещая зонд в пространстве между электродами с шагом 10 мм, найти 5 – 6 таких точек и соединить их линией. Это будет эквипотенциальная линия заданного потенциала.

6. Увеличивая напряжение, построить 3 – 5 эквипотенциальных линий способом, описанным в п. 5.
7. Построить линии напряженности исследуемого поля, учитывая, что они перпендикулярны эквипотенциальным линиям.

*Задание 2. Построение линий напряженности  
электрического поля*

1. Поместить в электролит плоский зонд  $Z_2$  и вращать его вокруг оси до тех пор, пока протекающий через микроамперметр ток не будет равен нулю. В этом случае плоскость электрода будет направлена по касательной к силовой линии электрического поля в данной точке электролита.
2. Найти направление силовых линий, перемещая щуп от одного электрода к другому и вдоль электродов с шагом 10 мм.
3. Построить картину силовых линий напряженности электрического поля.
4. Сравнить полученные линии напряженности с линиями, построенными в п. 7 задания 1. Сделать выводы.

*Задание 3. Проверка теоремы Гаусса  
для электрического поля*

1. Выбрать замкнутую поверхность в электролите между электродами, через которую будет определяться поток вектора  $\vec{E}$  (рекомендуется в качестве такой поверхности выбрать замкнутый контур в плоскости ванны в виде квадрата со стороной в две ширины зонда  $Z_2$ ).
2. Расположив зонд  $Z_2$  таким образом, чтобы одна и та же его сторона была обращена внутрь поверхности, измерить величину силы тока с помощью микроамперметра.
3. Переместив зонд таким образом, чтобы его последовательные положения, отстоящие друг от друга на ширину зонда, полностью описали замкнутую поверхность, измерить величину силы тока для каждого положения зонда.

4. Определить величину потока  $\Phi_E$  через замкнутую поверхность, пользуясь выражением  $\Phi_E = \rho \cdot I$ , где  $I$  – алгебраическая сумма токов,  $\rho = 10^3$  Ом·м.
5. Сделать выводы.

### Контрольные вопросы

#### Вариант 1

1. Что называется напряженностью и потенциалом электростатического поля? Какова связь между ними?
2. Сформулируйте принцип суперпозиции электростатических полей.
3. При каком распределении зарядов напряженность электростатического поля целесообразно находить с помощью теоремы Гаусса в интегральной форме?
4. *Задача.* Электрическое поле задано в виде  $\vec{E} = a\vec{i} + b\vec{j} + c\vec{k}$ , где  $a, b, c$  – постоянные. Найти потенциал  $\varphi(x, y, z)$ , учитывая что  $\varphi(0, 0, 0) = 0$ .

*Ответ:*  $\varphi = ax + by + cz$ .

#### Вариант 2

1. Что называется потоком вектора напряженности? Сформулируйте теорему Гаусса для вектора напряженности электрического поля.
2. Объясните, почему линии напряженности и эквипотенциальные поверхности перпендикулярны.
3. В чем суть метода моделирования в электролитической ванне?
4. *Задача.* Два одноименных точечных заряда  $q_1 = 100$  нКл и  $q_2 = 200$  нКл находятся на расстоянии 1 м друг от друга. Найти координату  $x$  точки, в которой напряженность поля, созданного этими зарядами, равна нулю. Заряд  $q_1$  поместить в начало координат.

*Ответ:*  $x = 0,41$  м.

#### Вариант 3

1. Чему равна циркуляция вектора напряженности электростатического поля? Сформулируйте условие потенциальности поля.

2. Изобразите силовые линии и эквипотенциальные поверхности поля, созданного: а) точечным зарядом; б) равномерно заряженной плоскостью.
3. Найдите с помощью теоремы Гаусса напряженность поля, созданного шаром радиусом  $R$ , заряд которого распределен по поверхности с плотностью  $\sigma$ .
4. *Задача.* Электрическое поле задано в виде  $\varphi = ax^3 + by^2 + cz$ , где  $a, b, c$  – постоянные. Найти зависимость  $\vec{E}(x, y, z)$ .  
*Ответ:*  $\vec{E} = 3ax^2\vec{i} + 2by\vec{j} + c\vec{k}$ .

## Лабораторная работа № 2-02

### ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ

*Цель работы* – изучение зависимости диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика от напряженности электрического поля, определение остаточного электрического смещения и коэрцитивной силы.

*Приборы и принадлежности:* источник переменного напряжения; конденсатор, между обкладками которого находится исследуемый сегнетоэлектрик (титанат бария  $BaTiO_3$ ); измерительная схема; осциллограф.

#### Изучение установки и вывод рабочих формул

Сегнетоэлектрики – это кристаллические диэлектрики, обладающие в определенном интервале температур спонтанной (самопроизвольной) поляризацией отдельных областей этого кристалла, которая существенно изменяется под влиянием внешних воздействий. Характерной особенностью сегнетоэлектриков является резкое возрастание (до нескольких тысяч) относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  в этом интервале температур. Например, при 20 °С диэлектрическая проницаемость сегнетовой соли равна 6000, титаната бария – от 1700 до 2000.

Кристаллы сегнетоэлектриков состоят из самопроизвольно поляризованных областей – доменов. Самопроизвольная поляризация доменов является результатом ориентации дипольных моментов всех молекул внутри домена в одном направлении. В отсутствие внешнего поля домены поляризованы таким образом, что суммарная поляризованность кристалла равна нулю. При внесении кристалла сегнетоэлектрика во внешнее электрическое поле границы доменов могут смещаться, причем объем доменов, поляризованных по полю, увеличивается за счет доменов, поляризованных против поля. Возможно также и зарождение новых доменов, поляризация в которых ориентирована вдоль  $\vec{E}$  внешнего поля. В результате этого в сегнетоэлектрике появляется отличная от нуля результирующая поляризованность. Зависимость поляризованности  $\vec{P}$  от напряженности внешнего электрического поля  $\vec{E}$  для сегнетоэлектриков нелинейна и имеет вид петли гистерезиса (от гр. *hystérēsis* – отставание, запаздывание) при циклических изменениях поля. Первоначально с увеличением напряженности  $E$  численное значение поляризованности  $P$  возрастет, как показывает кривая  $Oa$  на рис. 2.1. При некотором значении напряженности электрического поля  $E_m$  поляризованность сегнетоэлектрика перестает увеличиваться, т.е. достигает насыщения (точка  $a$  на рис. 2.1). С уменьшением  $E$  до нуля поляризованность  $P$  уменьшается до некоторой величины  $P_0$ , называемой остаточной поляризованностью.

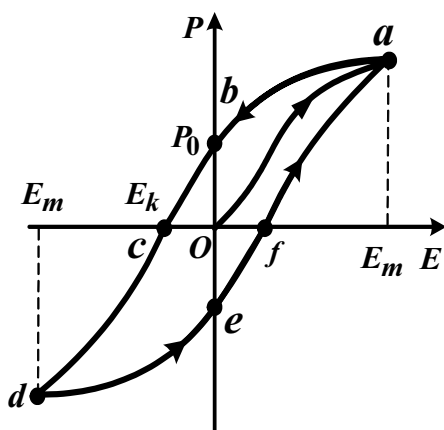


Рис. 2.1



Поляризованность исчезает полностью лишь под действием электрического поля противоположного направления при напряженности  $E_K$ , которая называется коэрцитивной силой (от лат. *coercitio* – удерживание). При дальнейшем увеличении электрического поля обратного направления сегнетоэлектрик вновь поляризуется по полю (кривая *cd*, рис. 2.1) до насыщения (точка *d*). Изменение поляризованности образца при уменьшении обратного поля до нуля и включении первоначального поля происходит вдоль кривой *defa*. Таким образом, при циклическом изменении электрического поля кривая, характеризующая изменение поляризованности сегнетоэлектрика, образует петлю.

Исследование зависимости поляризованности сегнетоэлектрика от напряженности электрического поля производится с помощью экспериментальной установки, электрическая схема которой изображена на рис. 2.2. Регулируемое напряжение подается на делитель напряжения, состоящий из сопротивлений  $R_1 = 510$  кОм и  $R_2 = 5,6$  кОм. Параллельно делителю включены две последова-

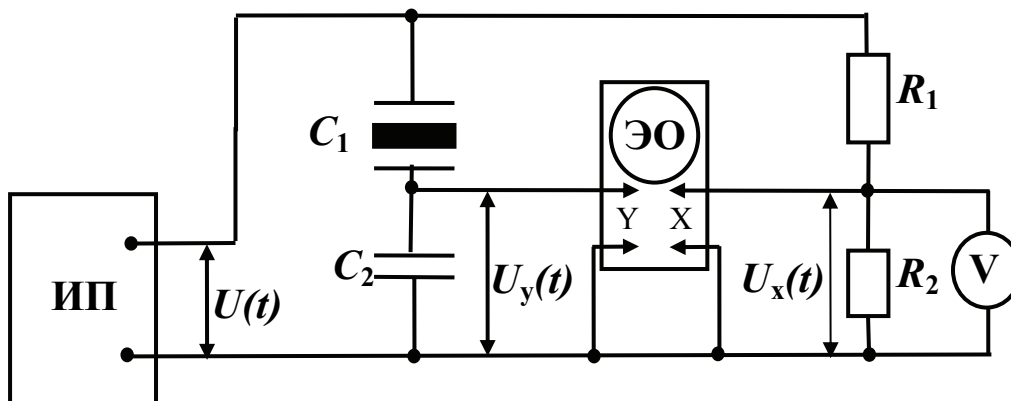


Рис. 2.2

тельно соединенные емкости: конденсатор  $C_1$  с исследуемым сегнетоэлектриком и эталонный конденсатор  $C_2 = 10$  мкФ, причем  $C_2 \gg C_1$ . Напряжение, подаваемое на вход *X* осциллографа ЭО с резистора  $R_2$ , можно вычислить следующим образом. Резисторы  $R_1$  и  $R_2$  включены последовательно, поэтому сила тока в них одинакова. Тогда, пользуясь законом Ома, можно записать

$$\frac{U(t)}{R_1 + R_2} = \frac{U_x(t)}{R_2},$$

откуда

$$U_x(t) = \frac{U(t)}{R_1 + R_2} R_2. \quad (2.1)$$

Следовательно, горизонтальное смещение луча пропорционально мгновенному значению напряжения  $U(t)$ .

Переменное напряжение  $U(t)$  приложено в основном к  $C_1$  (так как  $C_1 \ll C_2$ ) и создает в нем электрическое поле напряженностью

$$E(t) = \frac{U(t)}{d_1}, \quad (2.2)$$

где  $d_1$  – толщина пластины сегнетоэлектрика. Подставив  $U(t)$  из формулы (2.1) в (2.2), получим

$$E(t) = \frac{R_1 + R_2}{R_2 d_1} U_x(t). \quad (2.3)$$

Вертикальное отклонение луча пропорционально напряжению  $U_y(t)$  на эталонном конденсаторе  $C_2$ :

$$U_y(t) = \frac{q_2(t)}{C_2},$$

где  $q_2(t)$  – заряд на обкладке конденсатора  $C_2$ . Так как конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$  включены последовательно, то заряды на обкладках обоих конденсаторов будут одинаковыми:

$$q_1(t) = q_2(t) = q(t).$$

Тогда

$$U_y(t) = \frac{q(t)}{C_2} = \frac{\sigma_1(t) S_1}{C_2}, \quad (2.4)$$

где  $\sigma_1(t)$  – поверхностная плотность свободных зарядов на обкладках конденсатора  $C_1$ ;  $S_1$  – площадь пластин конденсатора  $C_1$ .

Вследствие того, что поверхностная плотность свободных зарядов  $\sigma_1(t)$  численно равна нормальной составляющей электрического смещения  $D_n$  в сегнетоэлектрике, из соотношения (2.4) получим

$$D(t) = \frac{C_2}{S_1} U_y(t). \quad (2.5)$$

Таким образом, электрическое смещение  $D(t)$  пропорционально вертикальному отклонению луча на экране осциллографа, а напряженность электрического поля в сегнетоэлектрике пропорциональна смещению луча по горизонтали (см. формулу (2.3)). Включив развертку осциллографа, на экране можно наблюдать зависимость  $D = D(E)$ , которая представляет собой петлю гистерезиса. Поскольку  $\vec{P} = \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \vec{D} \approx \vec{D}$  ( $\varepsilon \gg 1$ ), то наблюдаемая кривая (петля) аналогична зависимости поляризованности  $P$  от напряженности электрического поля  $E$ .

Смещение луча по осям  $X$  и  $Y$  зависит от чувствительности данного осциллографа. Если чувствительность осциллографа по оси  $X$  обозначить через  $a_x$  [В/дел.], а по оси  $Y$  – через  $a_y$  [В/дел.], то по смещению луча вычисляют напряжение:

$$U_x = a_x x, \quad U_y = a_y y, \quad (2.6)$$

где  $x$  и  $y$  – число делений (клеток) на экране осциллографа.

С учетом соотношений (2.6) формулы (2.3) и (2.5) приобретают вид

$$E(t) = \frac{1}{d_1} \frac{R_1 + R_2}{R_2} a_x x, \quad (2.7)$$

$$D(t) = \frac{C_2}{S_1} a_y y. \quad (2.8)$$

### Порядок выполнения работы

*Задание 1. Определение зависимости диэлектрической постоянной сегнетоэлектрика от напряженности поля*

1. Включить источник питания и осциллограф.
2. На осциллографе установить светящуюся точку в центре экрана. Регулируя напряжение  $U$ , получить наибольшее изображение петли гистерезиса (необходимо подождать несколько минут для прогрева сегнетоэлектрика).

3. Записать используемую чувствительность  $a_y$  осциллографа по оси  $Y$ .
4. Определить координату верхней точки (точка  $a$ , рис. 2.1) петли гистерезиса  $x_0$  (при максимальном размере петли) в делениях масштабной сетки. Измерить с помощью вольтметра значение  $U_x$ . С помощью полученных данных определить чувствительность  $a_x$  осциллографа по оси  $X$ .
5. Если петля гистерезиса смещается ("уплывает") относительно центра координатной сетки осциллографа, ручкой "Горизонтальное смещение луча" произвести корректировку.
6. Постепенно уменьшая напряжение, провести 8 – 10 измерений координат  $x_0$  и  $y_0$  верхних точек петель гистерезиса (размер петли уменьшать с шагом 0,25 деления по оси  $X$ ). Результаты занести в табл. 2.1.

Таблица 2.1

$x_0$ , дел.	$E$ , В/м	$y_0$ , дел.	$D$ , Кл/м <sup>2</sup>	$\varepsilon$

7. По формулам (2.7) и (2.8) вычислить соответствующие значения  $E$  и  $D$  и результаты занести в табл. 2.1 ( $d_1 = 0,3$  мм,  $S_1 = 1$  см<sup>2</sup>).
8. Построить график зависимости  $D = D(E)$ .
9. Пользуясь равенством  $\varepsilon = \frac{D}{\varepsilon_0 E}$  ( $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная), рассчитать  $\varepsilon$ , занести полученные значения в табл. 2.1 и построить график  $\varepsilon = \varepsilon(E)$ .
10. Сделать выводы.

*Задание 2. Определение остаточного электрического смещения и коэрцитивной силы сегнетоэлектрика*

1. Получить на экране максимальную петлю гистерезиса.
2. По координатной сетке экрана осциллографа определить координату  $y_{ост}$ , соответствующую остаточному электрическому смещению, и координату  $x_k$ , соответствующую коэрцитивной силе.

3. Рассчитать коэрцитивную силу и остаточное электрическое смещение сегнетоэлектрика по формулам (2.7) и (2.8).

### Контрольные вопросы

#### *Вариант 1*

1. Что такое электрический диполь? Что такое электрический дипольный момент?
2. Что такое вектор электрического смещения? Как он связан с векторами поляризованности и напряженности электрического поля?
3. В чем состоят особенности диэлектрических свойств сегнетоэлектриков? Что такое остаточная поляризованность?
4. *Задача.* Стеклянную пластинку ( $\epsilon = 7$ ) расположили в плоском воздушном конденсаторе таким образом, что она плотно прилегает к его обкладкам. Разница потенциалов между обкладками конденсатора  $U = 3$  В, расстояние между обкладками  $d = 10$  см. Найти поверхностную плотность связанных зарядов  $\sigma'$  на стеклянной пластинке.

*Ответ:*  $1,59$  нКл/м<sup>2</sup>.

#### *Вариант 2*

1. Какая физическая величина служит количественной мерой поляризации диэлектрика?
2. Как диэлектрик влияет на напряженность электрического поля? Каков физический смысл диэлектрической проницаемости среды?
3. Объясните причину возникновения диэлектрического гистерезиса сегнетоэлектриков.
4. *Задача.* Обкладки плоского конденсатора площадью  $S = 2 \cdot 10^{-2}$  м<sup>2</sup> каждая находятся в керосине на расстоянии  $d = 4$  мм друг от друга. Найти силу  $F$ , с которой они притягиваются друг к другу, если напряжение между ними  $U = 150$  В. Диэлектрическая проницаемость керосина  $\epsilon = 2$ .

*Ответ:*  $2,5 \cdot 10^{-4}$  Н.

#### *Вариант 3*

1. Что такое домен?

2. Сформулируйте теорему Гаусса для вектора  $D$ .
3. Опишите зависимость поляризованности сегнетоэлектрика от напряженности внешнего поля при диэлектрическом гистерезисе.
4. *Задача.* Обкладки плоского конденсатора, заряженного до разности потенциалов 1 кВ, изолированы друг от друга пластиной из диэлектрика. Какова относительная диэлектрическая проницаемость материала пластины, если при ее удалении разность потенциалов между обкладками конденсатора возрастет до 3 кВ?

*Ответ:*  $\varepsilon = 3$ .

### Лабораторная работа № 2-03

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРА С ПОМОЩЬЮ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ГАЛЬВАНОМЕТРА

*Цель работы* – определение емкости конденсатора и батареи конденсаторов с помощью баллистического гальванометра.

*Приборы и принадлежности:* источник питания постоянного тока; потенциометр; вольтметр; переключатель; зеркальный баллистический гальванометр; набор конденсаторов; соединительные провода.

### Описание установки и вывод рабочей формулы

Емкостью конденсатора называется величина, численно равная заряду  $q$ , который нужно сообщить одной из обкладок конденсатора с тем, чтобы изменить напряжение  $U$  между обкладками на единицу. Емкость конденсатора определяется соотношением

$$C = \frac{q}{U}. \quad (3.1)$$

Емкость зависит от геометрических параметров конденсатора и диэлектрических свойств среды, заполняющей пространство между обкладками.

В основу данной работы положен метод определения неизвестной емкости конденсатора по известной емкости. Если емкость одного из двух конденсаторов, находящихся при одинаковых напряжениях ( $U_0 = U_1$ ), известна (например  $C_0$ ), то емкость второго конденсатора

$$C_1 = \frac{C_0 q_1}{q_0}. \quad (3.2)$$

Это означает, что для определения неизвестной емкости конденсатора  $C_1$  необходимо измерить величину его заряда  $q_1$  и заряда  $q_0$  конденсатора с известной емкостью.

Определение зарядов конденсаторов в работе осуществляется с помощью баллистического гальванометра. Баллистический гальванометр отличается от обычного гальванометра магнитоэлектрической системы тем, что момент инерции его подвижной части искусственно увеличен путем добавления массы к вращающейся рамке (например, за счет применения дополнительных грузиков). Увеличение момента инерции приводит к значительному возрастанию периода колебаний подвижной части. Это позволяет применять баллистический гальванометр для измерения заряда, протекающего по цепи за промежуток времени, малый по сравнению с периодом собственных колебаний рамки гальванометра. Основное свойство баллистического гальванометра – это пропорциональность величины наибольшего угла поворота рамки  $\varphi$  протекающему через нее заряду:

$$q = D\varphi,$$

где  $D$  – коэффициент пропорциональности между величиной угла поворота и зарядом.

Отклонение «зайчика» гальванометра на  $n$  делений шкалы определяется углом поворота рамки  $\varphi$ . Оно также пропорционально заряду  $q$ , прошедшему через гальванометр при разрядке конденсатора:

$$q = Bn, \quad (3.3)$$

где  $B$  – константа, называемая постоянной гальванометра;  $n$  – показания гальванометра.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 3.1. Источник постоянного тока  $\mathcal{E}$  подключен к потенциометру  $R$ . Потенциометром регулируют напряжение  $U$ , которое подается на конденсатор  $C$  и измеряется вольтметром  $V$ . С помощью переключателя  $\Pi$  цепь зарядки размыкается, и конденсатор включается в цепь с гальванометром  $G$ , через который разряжается. Включив в цепь конденсатор с известной емкостью  $C_0$ , можно определить постоянную гальванометра  $B$ , которую находят из уравнения (3.3) с использованием соотношения (3.1):

$$B = \frac{q_0}{n_0} = \frac{C_0 U}{n_0}, \quad (3.4)$$

где  $U$  – напряжение на конденсаторе, измеряемое вольтметром;  $n_0$  – показания гальванометра (в делениях шкалы) при разрядке конденсатора  $C_0$ .

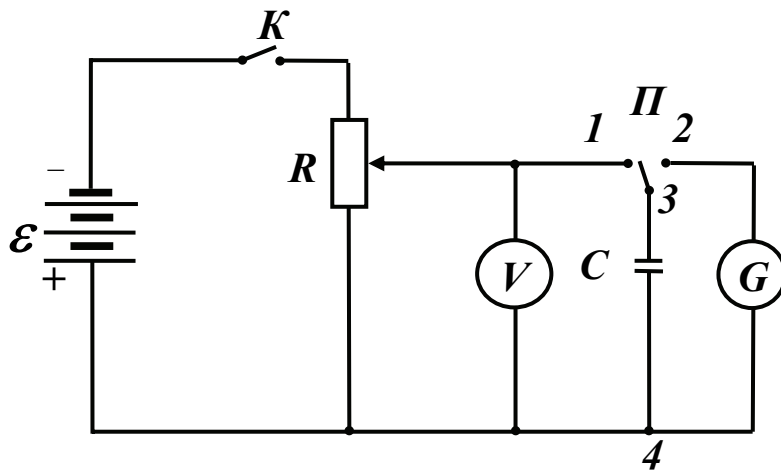


Рис. 3.1

Если конденсатор  $C_0$  заменить конденсатором с неизвестной емкостью  $C_x$  или батареей конденсаторов, то нужную емкость можно найти по формуле, полученной путем комбинации формул (3.2), (3.3) и (3.4):

$$C_x = \frac{B n_x}{U} = \frac{C_0 U}{n_0} \cdot \frac{n_x}{U} = C_0 \frac{n_x}{n_0}, \quad (3.5)$$

где  $n_x$  – показания гальванометра при разрядке конденсатора  $C_x$ .



## Порядок выполнения работы

1. Ручку потенциометра  $R$  установить в крайнее положение против часовой стрелки. С помощью соединительных проводов подсоединить к точкам 3, 4 электрической схемы установки конденсатор с известной емкостью  $C_0$ . Переключатель  $\Pi$  перевести в положение 1.
2. Включив питание, потенциометром установить напряжение зарядки конденсатора (значение  $U$  указано на рабочем месте).
3. При неизменном напряжении  $U$  произвести пять измерений первых отбросов «зайчика» гальванометра  $n_0$  переводом переключателя  $\Pi$  из положения 1 (зарядка) в положение 2 (разрядка конденсатора). Определить среднее значение показаний гальванометра  $\langle n_0 \rangle$ . Зарядку конденсатора производить в течение 30 с. Результаты опыта занести в табл. 3.1.

Таблица 3.1

$C_0 = \dots \text{мкФ}$	Номер измерения	1	2	3	4	5	$\langle n_0 \rangle$ , дел.
	$U = \dots \text{В}$	$n_0$ , дел.					

4. Подключить к точкам 3, 4 схемы вместо конденсатора  $C_0$  конденсатор с неизвестной емкостью  $C_x$  и повторить измерения, описанные в пп. 2 и 3. Определить среднее значение  $\langle n_x \rangle$ . Результаты опытов занести в табл. 3.2.

Таблица 3.2

$U = \dots \text{В}$	Номер измерения	1	2	3	4	5	$\langle n_x \rangle$ , дел.
	$n_x$ , дел.						

5. Рассчитать емкость конденсатора  $C_x$  по формуле (3.5).
6. Соединить конденсаторы  $C_0$  и  $C_x$  параллельно и указанным выше способом (пп. 4, 5) найти емкость полученной батареи конденсаторов  $C_{пар}^{экс}$ .
7. Рассчитать теоретическое значение емкости батареи конденсаторов по формуле

$$C_{пар}^{теор} = \sum_{i=1}^N C_i = C_0 + C_x$$

и сравнить ее с  $C_{пар}^{экс}$ .

8. Соединить конденсаторы  $C_0$  и  $C_x$  последовательно и, повторив задания пп. 4, 5, найти емкость полученной батареи конденсаторов  $C_{посл}^{экс}$ .
9. Рассчитать емкость этой батареи конденсаторов по формуле

$$C_{посл}^{теор} = \left( \sum_{i=1}^N \frac{1}{C_i} \right) = \frac{C_0 C_x}{C_0 + C_x}$$

и сравнить ее с  $C_{посл}^{экс}$ .

10. Проанализировать полученные результаты и сделать выводы.

## Контрольные вопросы

### *Вариант 1*

1. Дайте определение емкости уединенного проводника и конденсатора. Какова единица измерения емкости?
2. Выведите формулу емкости батареи конденсаторов, соединенных последовательно.
3. Чему равна энергия заряженного конденсатора?
4. *Задача.* Найти емкость сферического конденсатора, состоящего из двух концентрических сфер радиусами  $R_1 = 10$  см и  $R_2 = 10,5$  см. Пространство между сферами заполнено маслом с диэлектриче-

ской проницаемостью  $\varepsilon = 2$ . Какой радиус должен иметь уединенный шар, помещенный в масло, чтобы его емкость была такой же?

*Ответ:*  $C = 470$  пФ,  $R = 2,1$  м.

### *Вариант 2*

1. От чего зависят емкости уединенного проводника и конденсатора?
2. Получите выражение для емкости батареи конденсаторов, соединенных параллельно.
3. Выведите формулу для определения емкости плоского конденсатора.
4. *Задача.* Шары радиусами  $R_1 = 30$  см и  $R_2 = 6$  см имеют одноименные заряды:  $q_1 = q_2 = 2 \cdot 10^{-8}$  Кл. Каковы потенциалы шаров? Чему будет равен потенциал шаров  $\varphi'$  после соединения их проводом пренебрежимо малой емкости?

*Ответ:*  $\varphi_1 = 600$  В,  $\varphi_2 = 3000$  В,  $\varphi' = 1000$  В.

### *Вариант 3*

1. Как влияет диэлектрик, помещенный между обкладками конденсатора, на его емкость? Почему?
2. Чему равна объемная плотность энергии электрического поля?
3. Для каких целей в науке и технике используются конденсаторы?
4. *Задача.* Конденсатор емкостью  $C_1 = 10^{-9}$  Ф, заряженный до напряжения  $U = 100$  В, соединяют параллельно с незаряженным конденсатором емкостью  $C_2 = 2 \cdot 10^{-9}$  Ф. Какая энергия  $\Delta W$  теряется при этом на образование искры, возникающей в момент соединения конденсаторов?

*Ответ:*  $\Delta W = 3,3$  мкДж.

## Лабораторная работа № 2-04

### ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ЗАРЯДКИ И РАЗРЯДКИ КОНДЕНСАТОРА

*Цель работы* – экспериментальное изучение процессов зарядки и разрядки конденсатора и определение времени релаксации.

*Приборы и принадлежности:* электронный осциллограф с генератором прямоугольных импульсов; набор конденсаторов и электрических сопротивлений.

#### Описание установки и вывод рабочей формулы

На рис. 4.1 приведена схема, позволяющая рассмотреть процессы зарядки и разрядки конденсатора. Она содержит источник

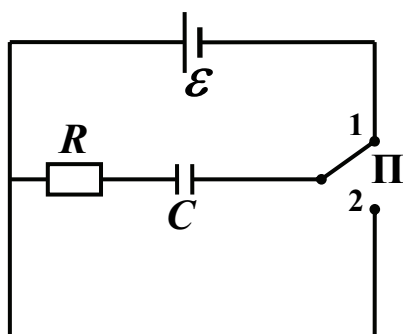


Рис. 4.1

постоянного тока, ЭДС которого  $\mathcal{E}$ , а также соединенные последовательно конденсатор  $C$  и сопротивление  $R$ . Переключатель  $\Pi$  предназначен для подключения конденсатора к источнику тока (при этом происходит зарядка конденсатора (положение 1)) или для отключения конденсатора от источника (при этом происходит разрядка конденсатора (положение 2)).

Рассмотрим процесс зарядки конденсатора. При переключении  $\Pi$  в положение 1 конденсатор начинает заряжаться и в цепи возникает ток, изменяющийся со временем. При этом сумма разности потенциалов на конденсаторе  $C$  и падения напряжения на сопротивлении  $R$  будет равна ЭДС источника:

$$\mathcal{E} = U_C + U_R = \frac{q}{C} + IR, \quad (4.1)$$

где  $q$  – заряд конденсатора;  $I$  – сила тока в цепи в данный момент времени. По мере зарядки конденсатора его заряд  $q$  возрастает, а

сила тока  $I$  уменьшается. Чтобы найти зависимость заряда  $q$  от времени, воспользуемся формулой (4.1). Так как  $I = \frac{dq}{dt}$ , то

$$\mathcal{E} = \frac{q}{C} + R \frac{dq}{dt}. \quad (4.2)$$

Решением этого линейного неоднородного дифференциального уравнения (с учетом начального условия  $q(t=0) = 0$ ) является функция

$$q(t) = q_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right), \quad (4.3)$$

где  $q_0 = \mathcal{E}C$  – максимальный заряд конденсатора.

Формула (4.3) выражает зависимость заряда конденсатора от времени в процессе его зарядки. График этой зависимости приведен на рис. 4.2 (кривая 1).

Чтобы конденсатор начал разряжаться, переключатель  $\Pi$  следует перевести в положение 2 (см. рис. 4.1). Поскольку теперь в цепи разрядки источник ЭДС отсутствует, уравнение (4.1) будет иметь вид

$$\frac{q}{C} + IR = 0.$$

Поскольку  $I = \frac{dq}{dt}$ , то

$$\frac{dq}{dt} + \frac{1}{RC}q = 0.$$

Решением этого уравнения, с учетом начального условия  $q(t=0) = q_0$ , является функция

$$q(t) = q_0 e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (4.4)$$

Формула (4.4) выражает зависимость заряда на конденсаторе от времени в процессе его разрядки. График этой зависимости приведен на рис. 4.2 (кривая 2).

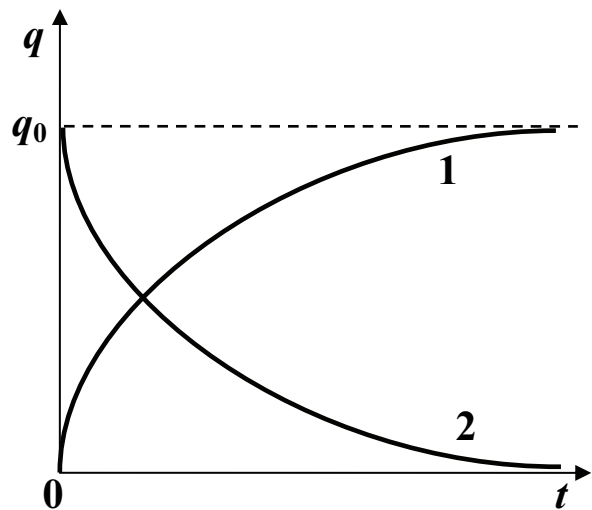


Рис. 4.2

Быстрота зарядки (разрядки) конденсатора определяется *постоянной времени*  $RC$ -цепи:  $\tau = RC$ . Очевидно, что  $\tau$  – это время, в течение которого после включения (выключения) ЭДС заряд конденсатора изменяется в  $e$  раз.

Схема лабораторной установки, используемой для экспериментального изучения процессов зарядки и разрядки конденсатора, приведена на рис. 4.3. В этой установке подключение и отключение

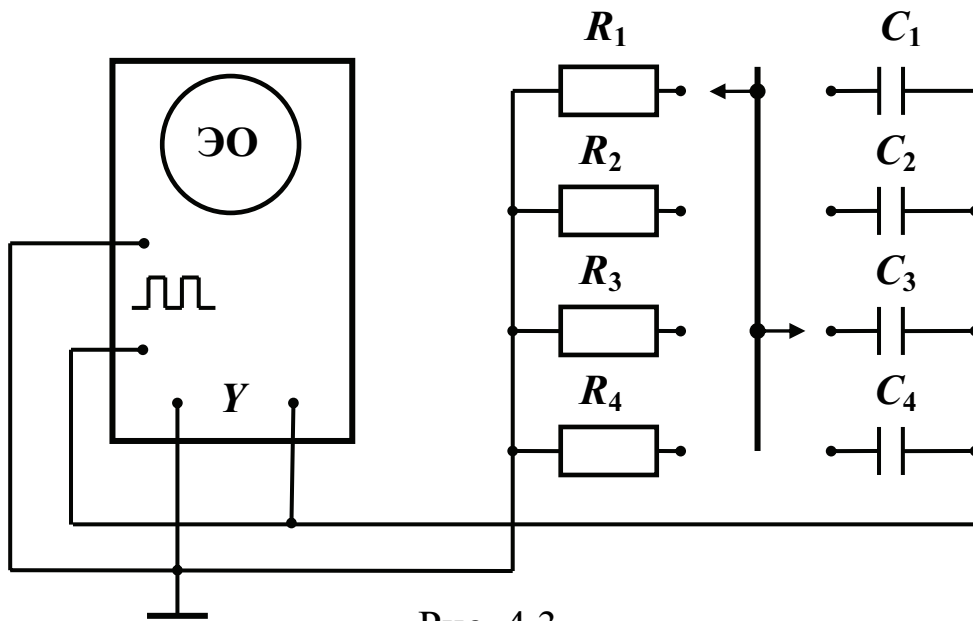


Рис. 4.3

источника от измерительной цепи имитируется подачей на  $RC$ -цепь прямоугольных импульсов от генератора, входящего в состав осциллографа (рис. 4.4, кривая 1). Рассмотрим принцип работы схемы рис. 4.3. Генератор прямоугольных импульсов в течение времени  $t_n$  (времени нарастания напряжения при зарядке конденсатора) дает постоянное по величине напряжение  $U_0$ . При этом реализуется схема зарядки конденсатора (см. рис. 4.1, переключатель  $\Pi$  в положении 1). После окончания зарядки начинается процесс разрядки конденсатора, которому соответствует время спада напряжения  $t_{cn}$ . При этом напряжение, которое дает генератор, равно нулю. В этом случае реализуется схема разрядки конденсатора (см. рис. 4.1, переключатель  $\Pi$  в положении 2). Процессы зарядки и разрядки повторяются с периодом  $T = t_n + t_{cn}$ . В лабораторной работе реализована электрическая схема, для которой время нараста-

ния напряжения при зарядке равно времени спада напряжения при разрядке конденсатора:  $t_n = t_{cn} = \frac{T}{2}$ . Подключая к генератору последовательно соединенные сопротивления  $R_i$  и  $C_j$ , можно исследовать процессы зарядки и разрядки конденсатора при различных значениях  $\tau = R_i C_j$ . Напряжение с конденсатора подается на вход осциллографа, на экране которого воспроизводится зависимость  $U_c(t)$  для данной  $RC$ -цепи. Поскольку напряжение между обкладками конденсатора пропорционально его заряду  $U_c(t) = \frac{q(t)}{C}$ , зависимость напряжения от времени  $U_c(t)$  подобна зависимости заряда конденсатора от времени  $q(t)$  (рис. 4.4, кривая 2).

Чтобы исследовать эту зависимость количественно, воспользуемся режимом работы осциллографа, в котором непрерывная кривая изображается в виде пунктирной линии (режим «Метки») (рис. 4.4).

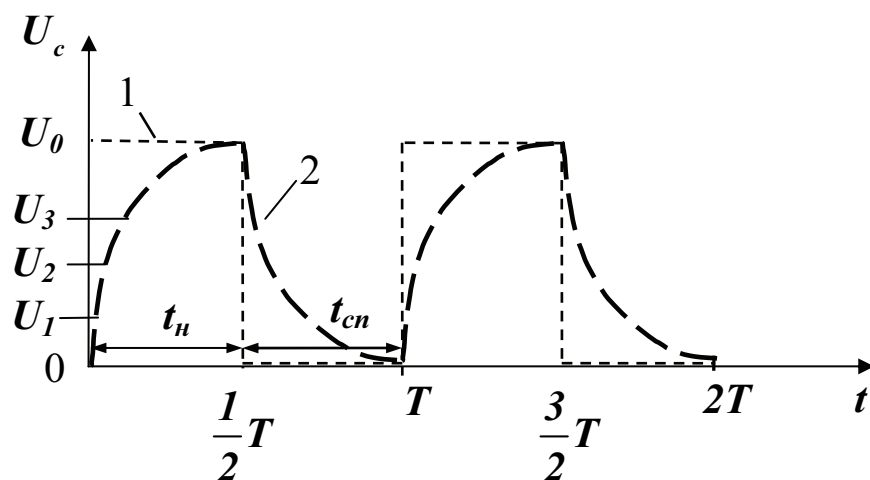


Рис. 4.4

Временной интервал между метками  $\Delta t_m$  соответствует расстоянию между началами соседних штрихов по горизонтальной оси времени; определяется положением переключателя «Метки» ( $\Delta t_m = 20, 100$  мкс). С помощью меток можно определить время нарастания (спада) напряжения на конденсаторе при его зарядке (разрядке). Например, если на отрезке  $0 - t_n$  укладывается шесть полных меток, временной интервал между которыми составляет  $\Delta t_m = 20$  мкс, то время нарастания напряжения при зарядке конден-

сатора  $t_n = 20 \cdot 6 = 120$  мкс. Ординаты точек кривой  $U_k$  на рис. 4.4, соответствующих началу каждой метки для моментов времени  $t_k = \kappa \Delta t_m$  ( $\kappa = 1, 2, \dots$ ), дают зависимость напряжения на конденсаторе от времени

$$U_k = f(t). \quad (4.5)$$

Эти данные используются для расчета постоянной времени  $\tau$ . Логарифмирование выражений (4.3) и (4.4) дает

$$\ln \frac{q_0}{q_0 - q} = \frac{t}{RC} = \frac{t}{\tau}, \quad \ln \frac{q_0}{q} = \frac{t}{\tau}.$$

Поскольку заряд  $q$  пропорционален напряжению на конденсаторе  $U_c$ , то можно записать следующее:

$$\ln \frac{U_0}{U_0 - U_k} = \frac{t}{\tau} \quad (\text{при зарядке}); \quad (4.6)$$

$$\ln \frac{U_0}{U_k} = \frac{t}{\tau} \quad (\text{при разрядке}). \quad (4.7)$$

Для расчета постоянной времени  $\tau$  строится график зависимости  $\ln \frac{U_0}{U_0 - U_k}$  (при зарядке) или  $\ln \frac{U_0}{U_k}$  (при разрядке) от времени  $t$ . Величина  $\tau$  определяется из соответствующих графиков. Например, для случая зарядки конденсатора (рис. 4.5)

$$\tau_{\text{эксн}} = \frac{\Delta t}{\Delta \left( \ln \frac{U_0}{U_0 - U_k} \right)}. \quad (4.8)$$

Аналогично вычисляется  $\tau$  для разряда конденсатора:

$$\tau_{\text{эксн}} = \frac{\Delta t}{\Delta \left( \ln \frac{U_0}{U_k} \right)}. \quad (4.9)$$

Здесь  $\Delta t$  – произвольно выбранный интервал времени, которому на графике соответствует изменение функций  $\Delta \left( \ln \frac{U_0}{U_0 - U_k} \right)$  – при зарядке или  $\Delta \left( \ln \frac{U_0}{U_k} \right)$  – при разрядке конденсатора.



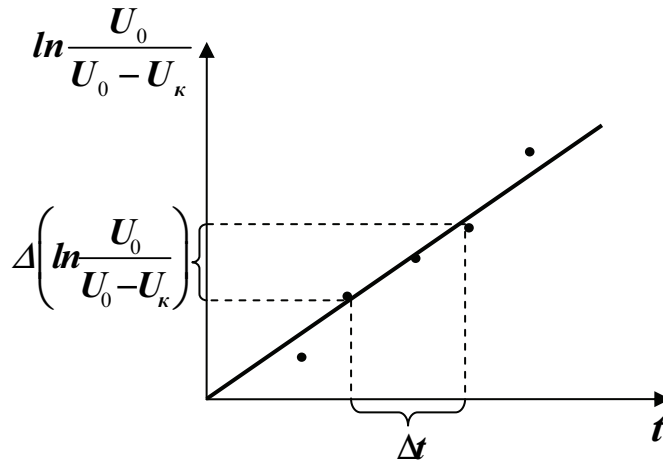


Рис. 4.5

### Порядок выполнения работы

*Задание 1. Определение постоянной времени для процесса зарядки конденсатора*

1. Подключить к электрической схеме резистор  $R_i$  и конденсатор  $C_j$  из набора, имеющегося на лабораторной установке (значения  $R_i$  и  $C_j$  задаются преподавателем).
2. Включить стенд и осциллограф, дать осциллографу прогреться 2 – 3 мин. Получить устойчивую картину зависимости напряжения конденсатора от времени  $U_c(t)$  (см. рис. 4.4).
3. Определить временные координаты меток на кривой нарастания напряжения на конденсаторе по формуле  $t_k = k\Delta t_m$ , где  $k$  – номер метки,  $\Delta t_m$  – временной интервал между метками (задается преподавателем).
4. Определить значения ординат  $U_k$  точек кривой  $U_c(t)$ , соответствующие началу каждой метки, и максимальное значение напряжения  $U_0$ . Данные занести в табл. 4.1.
5. Построить график зависимости  $\ln \frac{U_0}{U_0 - U_k}$  от времени  $t$ . Определить с помощью графика величину  $\tau_{эксн}$  по формуле (4.8).
6. Вычислить теоретическое значение постоянной времени по формуле  $\tau_{теор} = R_i C_j$  и сравнить его с  $\tau_{эксн}$ .
7. Сделать выводы.

Таблица 4.1

Номер метки $k$	$t_k = k\Delta t_m$ , мкс	$U_k$ , дел.	$U_0$ , дел.	$\ln \frac{U_0}{U_0 - U_k}$	$\tau_{\text{эксп}}, \text{с}$	$\tau_{\text{теор}}, \text{с}$
1						
2						
...						
6						

*Задание 2. Определение постоянной времени  
для процесса разрядки конденсатора*

1. Подключить к электрической схеме резистор  $R_i$  и конденсатор  $C_j$  из набора, имеющегося на лабораторной установке (значения  $R_i$  и  $C_j$  задаются преподавателем).
2. Включить стенд и осциллограф, дать осциллографу прогреться 2 – 3 мин. Получить устойчивую картину зависимости напряжения конденсатора от времени  $U_c(t)$  (см. рис. 4.4).
3. Определить временные координаты меток на кривой спада напряжения на конденсаторе по формуле  $t_k = k\Delta t_m$ , где  $k$  – номер метки,  $\Delta t_m$  – временной интервал между метками (задается преподавателем).
4. Определить значения ординат  $U_k$  точек кривой  $U_c(t)$ , соответствующие началу каждой метки, и максимальное значение напряжения  $U_0$ . Данные занести в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Номер метки $k$	$t_k = k\Delta t_m$ , мкс	$U_k$ , дел.	$U_0$ , дел.	$\ln \frac{U_0}{U_k}$	$\tau_{\text{эксп}}, \text{с}$	$\tau_{\text{теор}}, \text{с}$
1						
2						
...						
6						

5. Построить график зависимости  $\ln \frac{U_0}{U_k}$  от времени  $t$ . Определить с помощью графика величину  $\tau_{эксн}$  по формуле (4.9).
6. Вычислить теоретическое значение постоянной времени по формуле  $\tau_{теор} = R_i C_j$  и сравнить его с  $\tau_{эксн}$ .
7. Сделать выводы.

### Контрольные вопросы

#### Вариант 1

1. Что называется конденсатором? Дайте определение емкости конденсатора.
2. Что называется постоянной времени  $RC$ -цепи? Каков физический смысл этой величины?
3. Докажите, что постоянная времени  $\tau$  для  $RC$ -цепи имеет размерность времени.
4. *Задача.* К источнику постоянного тока последовательно присоединены конденсатор емкостью  $C = 200$  мкФ и сопротивление  $R = 12$  Ом. Определить время, за которое напряжение на конденсаторе уменьшается в 2 раза.  
*Ответ:*  $t = 1,67$  мс.

#### Вариант 2

1. Какой конденсатор называется плоским? Выведите формулу для определения емкости плоского конденсатора.
2. Запишите законы изменения заряда конденсатора со временем при зарядке и разрядке конденсатора.
3. Заряженный конденсатор отключен от источника напряжения. Что произойдет с энергией конденсатора, если первоначально пустой зазор между обкладками заполнить диэлектриком с проницаемостью  $\epsilon > 1$ ?
4. *Задача.* Определить величину заряда, который накапливается за время  $t = 15$  мс на конденсаторе, подключенном к источнику тока с  $\mathcal{E} = 2$  В. Внешнее сопротивление цепи  $R = 10$  Ом, емкость конденсатора  $C = 350$  мкФ.  
*Ответ:*  $q = 0,63$  мкКл.

### *Вариант 3*

1. Дайте определение емкости уединенного проводника. Выведите формулу для определения емкости уединенного шара.
2. Запишите дифференциальные уравнения, описывающие процессы зарядки и разрядки конденсатора.
3. Какие параметры цепи влияют на процессы зарядки и разрядки конденсатора?
4. *Задача.* Определить сопротивление резистора, который нужно последовательно подключить к конденсатору емкостью 100 мкФ, если известно, что за 2 мс заряд на конденсаторе уменьшается в 2 раза.

*Ответ:*  $R = 28,9 \text{ Ом}$ .

## **Лабораторная работа № 2-05**

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭДС ИСТОЧНИКА ПОСТОЯННОГО ТОКА КОМПЕНСАЦИОННЫМ МЕТОДОМ**

*Цель работы* – ознакомление с компенсационным методом, применение этого метода для измерения ЭДС источника постоянного тока.

*Приборы и принадлежности:* нормальный элемент Вестона; элемент с неизвестной ЭДС (батарейка); источник опорного напряжения; два магазина сопротивлений; микроамперметр.

### **Описание установки и вывод рабочих формул**

Компенсационные методы широко используются для измерения электрических величин благодаря своей универсальности (можно измерить ЭДС, напряжение, ток, сопротивление, мощность), надежности и высокой точности измерений. Основная идея метода заключается в том, что, например, измеряемая ЭДС уравновешивается (компенсируется) падением напряжения на некото-

ром участке так, что в результате ток в цепи с неизвестной ЭДС отсутствует.

Упрощенная электрическая схема для измерения ЭДС элемента компенсационным методом приведена на рис. 5.1. От источника опорного напряжения  $\mathcal{E}_0$  через сопротивление внешней цепи  $R$ , состоящее из двух переменных сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  ( $R = R_1 + R_2$ ), протекает ток. К узлу **B** через микроамперметр подсоединяют элемент с известной ЭДС –  $\mathcal{E}_N$  (к точке **A** источники  $\mathcal{E}_N$  и  $\mathcal{E}_0$  подключаются одноименными полюсами). Сопротивление участков **AB** ( $R_1$ ) и **BC** ( $R_2$ ) внешней цепи можно подобрать таким образом, чтобы падение напряжения на участке **AB** было равно ЭДС элемента  $\mathcal{E}_N$  (при этом их суммарное сопротивление  $R$  остается неизменным). В этом случае микроамперметр показывает отсутствие тока.

По первому правилу Кирхгофа для узла **A**

$$I_1 + I_2 - I = 0. \quad (5.1)$$

Применив второе правило Кирхгофа к контуру **B** $\mathcal{E}_N$ **AB**, получим уравнение

$$\mathcal{E}_N = I_2(r + R_A) + IR_1, \quad (5.2)$$

где  $r$  – внутреннее сопротивление элемента  $\mathcal{E}_N$ ;  $R_A$  – сопротивление микроамперметра.

Если компенсация достигнута, то сила тока  $I_2$  в указанном контуре отсутствует и уравнения (5.1) и (5.2) принимают следующий вид:

$$I_1 = I; \quad \mathcal{E}_N = IR_1. \quad (5.3)$$

Заменяя элемент  $\mathcal{E}_N$  с помощью переключателя **П** (рис. 5.1) на элемент с неизвестной ЭДС  $\mathcal{E}_X$  и изменяя величины сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  (суммарное  $R$  остается неизменным), можно снова добиться отсутствия прохождения через микроамперметр тока. Это будет иметь место при другом сопротивлении  $R_X$  участка **AB**. Тогда вместо (5.3) можно записать

$$I_1 = I, \quad \mathcal{E}_X = IR_X. \quad (5.4)$$

Из выражений (5. 3) и (5. 4) получим формулу, по которой определяется неизвестная ЭДС:

$$\mathcal{E}_X = \frac{R_X}{R_1} \mathcal{E}_N. \quad (5.5)$$

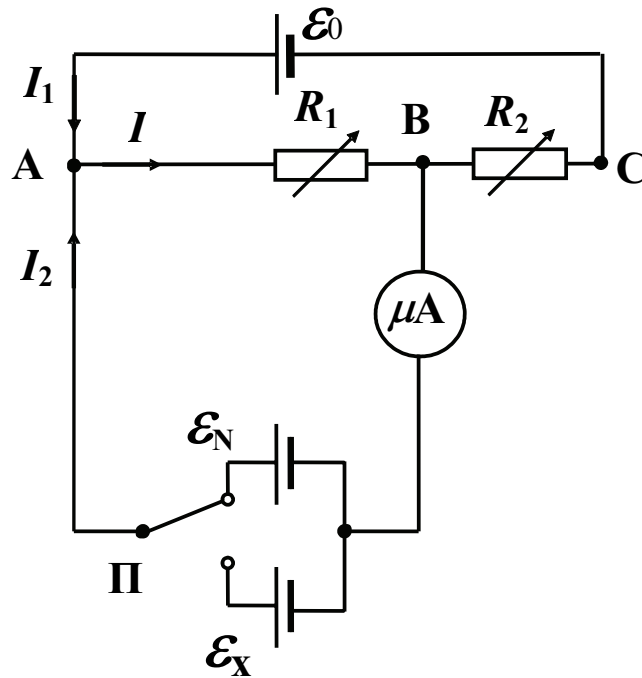


Рис. 5.1

Электрическая схема лабораторной установки приведена на рис. 5.2. В качестве известной ЭДС  $\mathcal{E}_N$  используется нормальный элемент Вестона, являющийся разновидностью гальванических элементов. Разность потенциалов между электродами элемента возникает за счет окислительно-восстановительных реакций, протекающих в насыщенном растворе сульфата кадмия с добавлением ртути и сульфата ртути. Электродвижущая сила элемента Вестона воспроизводима в высокой степени, что позволяет использовать элемент как эталон, ЭДС его при 20 °С будет  $\mathcal{E}_N = 1,0183 \text{ В}$ .

В качестве элемента с неизвестной ЭДС  $\mathcal{E}_X$  используется батарейка,

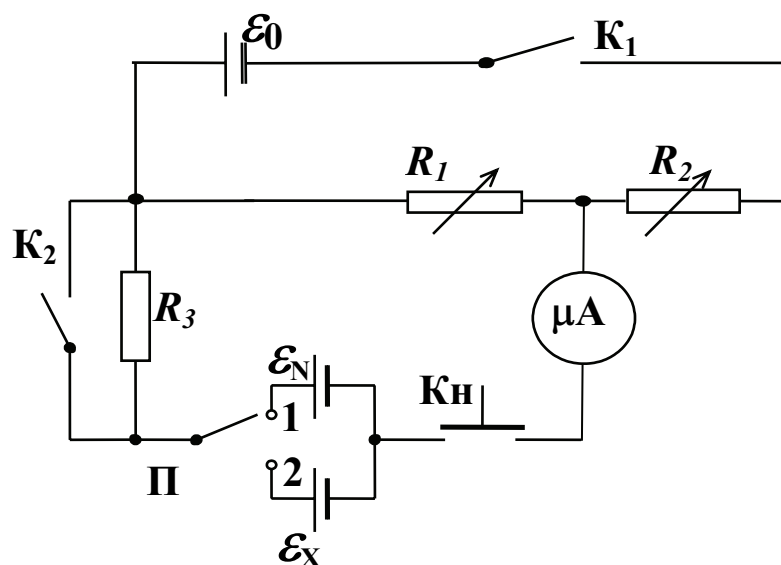


Рис. 5.2

которая подключается к источнику опорного напряжения  $\mathcal{E}_0$  одноименными полюсами, как и нормальный элемент  $\mathcal{E}_N$ . Ключ  $K_1$  служит для включения опорного напряжения. Кнопка  $K_N$  предназначена для кратковременного замыкания цепи микроамперметра;  $R_3$  – большое (порядка  $10^4$  Ом) сопротивление, предохраняющее микроамперметр и нормальный элемент от прохождения больших токов при предварительной грубой компенсации;  $K_2$  – ключ, служащий для замыкания накоротко этого сопротивления при точной компенсации. В качестве переменных сопротивлений используются магазины сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$ . Компенсация достигается подбором сопротивлений этих магазинов при условии постоянства их суммарного сопротивления.

### Порядок выполнения работы

1. На магазинах сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  установить величины сопротивлений по 20 кОм на каждом.

2. Поместить в рабочее гнездо установки батарейку с неизвестной ЭДС (необходимо обеспечить такую же полярность, как и на установке у источника  $\mathcal{E}_N$ ).
3. Замкнуть ключ  $K_1$ .
4. Включить в цепь нормальный элемент, для чего переключатель  $\Pi$  перевести в положение 1. Ключ  $K_2$  остается разомкнутым, что соответствует положению «Грубо».
5. При кратковременном нажатии кнопки  $K_n$  добиться отсутствия прохождения через микроамперметр тока. Для этого, используя первые три декады магазинов ( $\times 10000$ ,  $\times 1000$ ,  $\times 100$ ), изменять сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  так, чтобы их сумма  $R$  оставалась неизменной, т.е. равной 40 кОм.
6. Замкнув ключ  $K_2$  (положение «Точно»), произвести более точную компенсацию тока через микроамперметр, повторив операции п. 5 с использованием оставшихся декад магазинов сопротивления. Записать величину сопротивления  $R_1$  первого магазина сопротивлений, при котором наблюдается компенсация тока.
7. Переключателем  $\Pi$  вместо нормального элемента  $\mathcal{E}_N$  включить в цепь батарейку.
8. Повторив операции пп. 5 и 6, найти значение сопротивления  $R_x$  первого магазина сопротивлений, при котором достигается компенсация тока через батарейку.
9. По формуле (5.5) найти значение ЭДС исследуемой батарейки.

## Контрольные вопросы

### *Вариант 1*

1. Назовите условия существования постоянного электрического тока.
2. Запишите закон Ома для замкнутой цепи.
3. Что называется напряженностью поля сторонних сил? Чему равна циркуляция вектора напряженности поля сторонних сил?



4. *Задача.* Источник тока замыкают сначала на внешнее сопротивление  $R_1 = 2$  Ом, а затем на внешнее сопротивление  $R_2 = 0,5$  Ом. В каждом из этих случаев мощность  $P$ , выделяемая во внешней части цепи, одинакова и равна 2,54 Вт. Найти ЭДС источника и его внутреннее сопротивление.

*Ответ:* 3,38 В; 1 Ом.

### *Вариант 2*

1. Что называется электродвижущей силой источника тока и напряжением на участке цепи?
2. Запишите и сформулируйте правила Кирхгофа.
3. Запишите закон Ома в дифференциальной форме.
4. *Задача.* Если вольтметр соединить последовательно с сопротивлением  $R = 10^4$  Ом, то при напряжении  $U_0 = 120$  В на концах цепи, образованной сопротивлением и вольтметром, последний покажет  $U_1 = 50$  В. Если его соединить последовательно с неизвестным сопротивлением  $R_X$ , то при тех же условиях вольтметр покажет  $U_2 = 10$  В. Определить величину сопротивления  $R_X$ .

*Ответ:*  $7,86 \cdot 10^4$  Ом.

### *Вариант 3*

1. Запишите закон Ома для однородного и неоднородного участков цепи.
2. Что называется падением напряжения на участке цепи?
3. Объясните причины ошибок при непосредственном измерении ЭДС с помощью вольтметра.
4. *Задача.* В конце зарядки батареи аккумуляторов током  $I_1 = 3$  А присоединенный к ней вольтметр показывал напряжение  $U_1 = 4,25$  В. В начале разрядки той же батареи током  $I_2 = 4$  А вольтметр показывал напряжение  $U_2 = 3,9$  В. Определить ЭДС и внутреннее сопротивление батареи, считая их постоянными.

*Ответ:* 4,1 В; 0,05 Ом.

## Лабораторная работа № 2-06

### РАСШИРЕНИЕ ПРЕДЕЛА ИЗМЕРЕНИЯ МИКРОАМПЕРМЕТРА

*Цель работы* – расширение предела измерения и градуировка микроамперметра.

*Приборы и принадлежности:* прибор FPM-01; микроамперметр; магазин сопротивлений.

#### Описание лабораторной установки и вывод рабочей формулы

Лабораторная установка (рис. 6.1) состоит из прибора FPM-01 (1), магазина сопротивлений (6) и микроамперметра (5), предел измерения которого необходимо расширить. В состав прибора FPM-01 входят следующие элементы: регулируемый источник постоянного тока, реохорд (2), вольтметр (3) и миллиамперметр

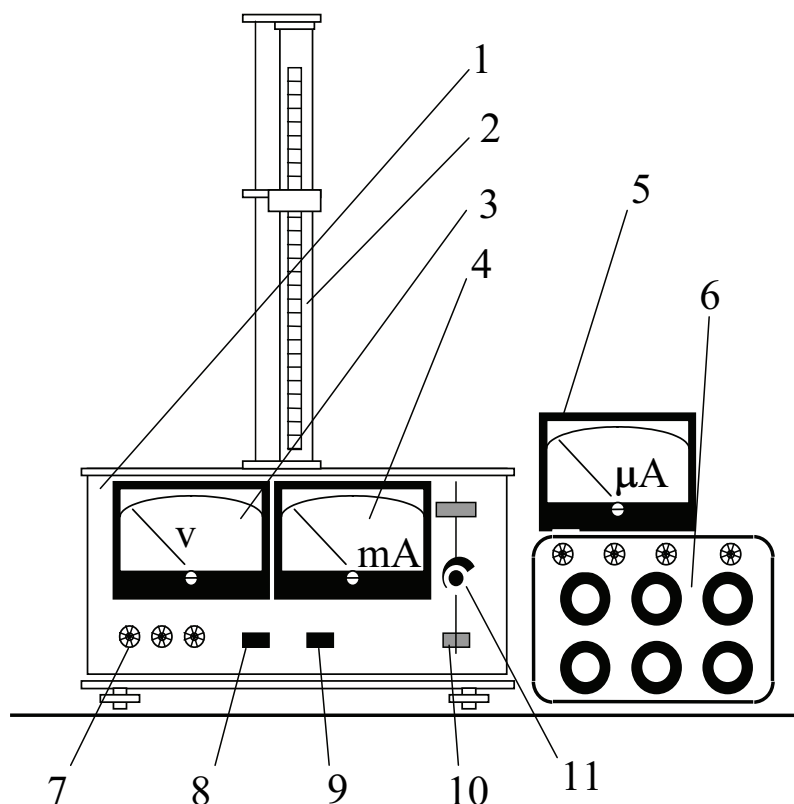


Рис. 6.1

(4). Реохорд в работе используется в качестве регулируемого шунта: с помощью ползуна реохорда задается необходимая длина проволоки, выполняющей роль шунта.

Расширение пределов измерения микроамперметра производится в тех случаях, когда необходимо измерить электрические токи, величина которых превышает предел его измерений. Для этого параллельно микроамперметру подсоединяют проводник (шунт) с электрическим сопротивлением  $R_{ш}$  меньшим, чем сопротивление амперметра  $R_a$ . Тогда измеряемый ток силой  $I_0$  разветвляется на проходящий через амперметр ток силой  $I_a$  и ток, который протекает через шунт, силой  $I_{ш}$  (рис. 6.2):

$$I_0 = I_a + I_{ш}. \quad (6.1)$$

Напряжения на амперметре и шунте, поскольку они включены параллельно, будут одинаковыми:

$$U_a = U_{ш}. \quad (6.2)$$

В соответствии с законом Ома для однородного участка цепи соотношение (6.2) можно переписать в следующем виде:

$$I_a R_a = I_{ш} R_{ш},$$

откуда

$$I_{ш} = \frac{R_a}{R_{ш}} I_a. \quad (6.3)$$

Подстановка соотношения (6.3) в формулу (6.1) дает

$$I_0 = I_a + \frac{R_a}{R_{ш}} I_a = I_a \left( 1 + \frac{R_a}{R_{ш}} \right) = n I_a, \quad (6.4)$$

где  $n = 1 + \frac{R_a}{R_{ш}}$  – коэффициент расширения предела измерения амперметра.

Этот результат означает, что через амперметр протекает ток, сила которого в  $n$  раз меньше, чем измеряемый ток  $I_0$ . Для того чтобы определить величину измеряемого тока  $I_0$ , необходимо показания амперметра умножить на величину  $n$ . Если известны со-

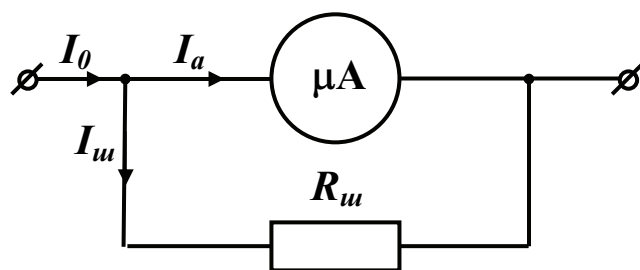


Рис. 6.2

противление амперметра  $R_a$  и значение  $n$ , то сопротивление шунта можно рассчитать по формуле

$$R_{ш} = \frac{R_a}{n-1}. \quad (6.5)$$

### Порядок выполнения работы

1. Ручку «Регулировка тока» (поз. 11, рис. 6.1) на лицевой панели лабораторного устройства перевести в крайнее положение против часовой стрелки.
2. Включить лабораторное устройство, для чего нажать кнопку «Сеть» (поз. 10, рис. 6.1).
3. С помощью кнопок коммутации (поз. 8, 9, рис. 6.1) реализовать схему, предназначенную для определения электрического сопротивления микроамперметра (рис 6.3). Состояние кнопок на лабораторном устройстве: кнопка «V - mA» – отжата; кнопка «Изм. R - Град.» – нажата.

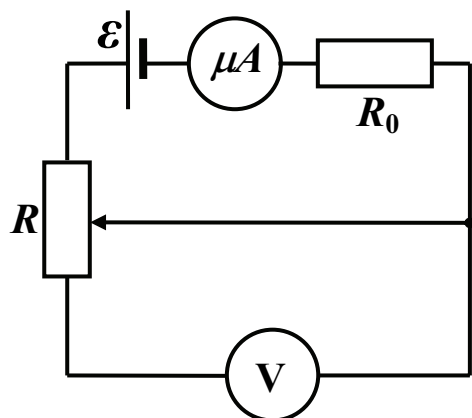


Рис. 6.3

4. На магазине сопротивлений установить значение сопротивления  $R_0 = 10$  кОм и, вращая ручку «Регулировка тока», установить максимальное отклонение стрелки микроамперметра.
5. Записать в табл. 6.1 показания измерительных приборов: силу тока микроамперметра  $I_a$ , напряжение вольтметра  $U_0$ .

Таблица 6.1

$R_0$ , Ом	$U_0$ , В	$I_a$ , мкА	$R_a$ , Ом	$n$	$R_{ш}$ , Ом	$S$ , м <sup>2</sup>	$l$ , м

6. Определить электрическое сопротивление микроамперметра по формуле

$$R_a = \frac{U_0}{I_a} - R_0.$$

7. Для указанного преподавателем значения коэффициента расширения предела измерения микроамперметра  $n$  рассчитать необходимое сопротивление шунта  $R_{ш}$  по формуле (6.5).
8. Определить длину провода реохорда, обеспечивающую полученное сопротивления шунта, по формуле  $l = \frac{R_{ш}S}{\rho}$ , где  $S$  и  $\rho$  –

поперечное сечение и удельное сопротивление проволоки реохорда соответственно (их величины указаны на установке).

9. С помощью ползуна реохорда установить рассчитанную длину проволоки  $l$ .
10. Кнопками коммутации лабораторного устройства реализовать схему для градуировки микроамперметра (рис. 6.4). Состояние кнопок на лабораторном устройстве: кнопка «V - mA» – нажата; кнопка «Изм. R – Град.» – нажата.

11. Провести градуировку микроамперметра, для чего зарегистрировать величины тока в цепи  $I$  (показания миллиамперметра на лицевой панели устройства) и соответствующие им показания микроамперметра  $N$ , выраженные в делениях шкалы. Результаты измерений занести в табл. 6.2.

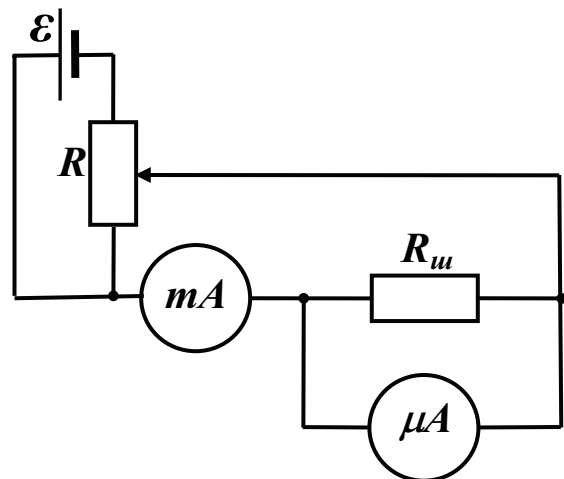


Рис. 6.4

Таблица 6.2

$N$ , дел.	0	5	10	15	20	25	30
$I$ , mA							

12. По данным табл. 6.2 построить градуировочную кривую – зависимость величины тока от показаний микроамперметра  $I = f(N)$ .
13. По графику определить цену деления шкалы шунтированного микроамперметра. Для этого с помощью графика определить для числа делений  $N = 30$  соответствующее ему значение силы тока  $I$ , затем разделить величину силы тока  $I$  на число делений  $N$ .

### Контрольные вопросы

#### *Вариант 1*

1. Как включаются в цепь приборы, предназначенные для измерения силы тока? Нарисуйте электрическую схему.
2. Сформулируйте закон Ома для однородного и неоднородного участков цепи, для замкнутой цепи.
3. Опишите методику определения электрического сопротивления микроамперметра, использованную в данной работе.
4. *Задача.* Найти отношение собственного потребления электрической мощности шунтом к мощности, потребляемой амперметром (в общем случае), если проходящий через амперметр ток в  $n$  раз меньше измеренного тока.

*Ответ:*  $\frac{N_{ш}}{N_a} = n - 1$ .

#### *Вариант 2*

1. Можно ли с помощью вольтметра измерить силу тока? Объясните, как это можно выполнить, нарисуйте электрическую схему.
2. Сформулируйте правила Кирхгофа.
3. Каким образом можно расширить предел измерения амперметра?
4. *Задача.* Миллиамперметр с внутренним сопротивлением  $9,9 \text{ Ом}$  может измерять силу тока не более  $10 \text{ мА}$ . Что нужно сделать, чтобы этот прибор можно было применять для измерения силы тока до  $1 \text{ А}$ ?

*Ответ:* подключить шунт сопротивлением  $0,1 \text{ Ом}$ .

#### *Вариант 3*

1. Выведите формулу для расчета величины сопротивления шунта.

2. Как расширить пределы измерения вольтметра? Нарисуйте электрическую схему.
3. Как определить цену деления амперметра с шунтом?
4. *Задача.* Амперметр с сопротивлением  $R_a = 0,16$  Ом шунтирован сопротивлением  $R_{ш} = 0,04$  Ом. Амперметр показывает ток  $I_a = 8$  А. Найти ток  $I_0$ , текущий в цепи.  
*Ответ:*  $I_0 = 40$  А.

### Лабораторная работа № 2-07

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКА

*Цель работы* – изучение методов определения электрического сопротивления с помощью вольтметра, амперметра и моста постоянного тока и определение удельного электрического сопротивления.

*Приборы и оборудование:* прибор ФРМ-01; мост постоянного тока.

### Описание установки и методики эксперимента

Лабораторная установка (рис. 7.1) состоит из прибора ФРМ-01 (1) и подсоединенного к нему с помощью проводников моста постоянного тока (6). Прибор ФРМ-01 включает в себя регулируемый источник постоянного тока, реохорд (2) с метрической шкалой и исследуемым проводом (5), вольтметр (3), миллиамперметр (4).

Для определения величин активных сопротивлений с невысокой точностью применяются методы, основанные на измерении силы тока и напряжения в цепи проводника с помощью амперметра и вольтметра. Высокая точность измерения сопротивлений достигается применением мостовых схем (или мостов), диапазон измеряемых сопротивлений при этом очень большой – от  $10^{-8}$  до  $10^{15}$  Ом. Мост является устройством, позволяющим измерять сопротивления методом сравнения их с образцовой мерой. Он состоит из цепи последовательно соединенных сопротивлений, к которой подсоединены источник питания и гальванометр в качестве нуль-индикатора.

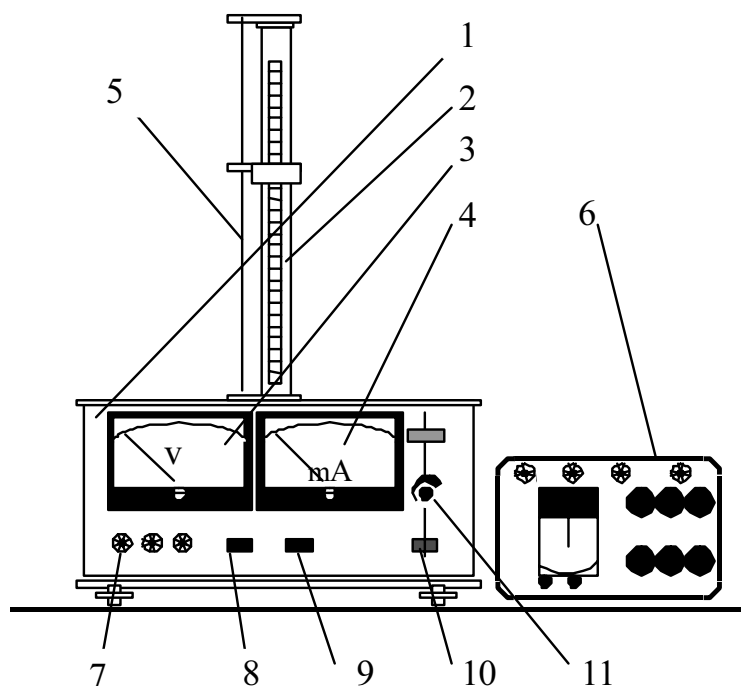


Рис. 7.1

Для определения сопротивления исследуемого проводника по измерению напряжения и силы тока применяют две схемы включения вольтметра и амперметра в электрическую цепь. В первой схеме (рис.7.2) измеряемое сопротивление  $R$  и миллиамперметр с сопротивлением  $R_a$  ( $R_a = 0,15$  Ом) включены последовательно, а вольтметр с сопротивлением  $R_V$  ( $R_V = 2500$  Ом) – параллельно. По закону Ома получим

$$I_a(R_a + R) = U_V,$$

где  $I_a$  – сила тока, протекающего через миллиамперметр;  $U_V$  – напряжение на данном участке цепи. Отсюда

$$R = \frac{U_V}{I_a} - R_a, \quad (7.1)$$

т.е. появляется погрешность измерения на величину  $R_a$ . Поэтому эту схему применяют для измерения сопротивлений, больших по сравнению с сопротивлением амперметра (в 100 раз и более), что позволяет пренебречь величиной  $R_a$ , т.е. считать  $R = \frac{U_V}{I_a}$ .



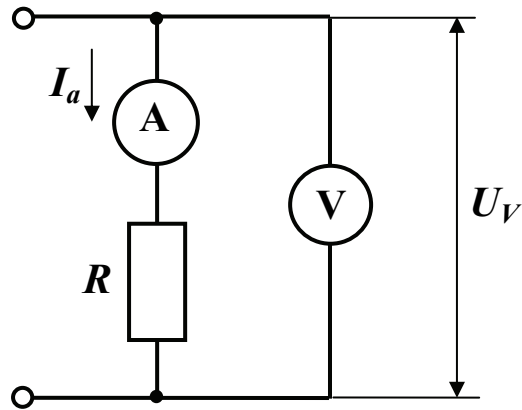


Рис. 7.2

При использовании второй схемы включения вольтметра и амперметра в цепь (рис. 7.3) исследуемый проводник сопротивлением  $R$  и вольтметр сопротивлением  $R_V$  включены параллельно, а миллиамперметр сопротивлением  $R_a$  – последовательно. С помощью первого правила Кирхгофа, согласно которому алгебраическая сумма токов в узле равна нулю, получим

$$I_a = I_V + I, \quad (7.2)$$

где  $I_a$  – сила тока, протекающего через миллиамперметр;  $I_V$  – сила тока, протекающего через вольтметр;  $I$  – сила тока, протекающего через сопротивление  $R$ .

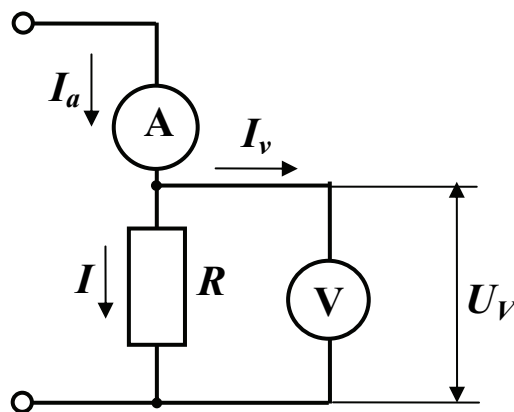


Рис. 7.3

Применив закон Ома, можем записать

$$I_V = \frac{U_V}{R_V}, \quad I = \frac{U_V}{R}.$$

Тогда выражение (7.2) примет вид

$$I_a = U_V \left( \frac{1}{R_V} + \frac{1}{R} \right),$$

откуда

$$R = \frac{U_V}{I_a - \frac{U_V}{R_V}} = \frac{U_V R_V}{I_a R_V - U_V}. \quad (7.3)$$

Эту схему применяют для измерения сопротивлений, меньших по сравнению с сопротивлением вольтметра (в 100 раз и более). В этом случае силой тока в вольтметре можно пренебречь, т.е. считать  $R = U_V / I_a$ .

### Порядок выполнения работы

*Задание 1. Определение сопротивления проводника с помощью вольтметра и амперметра с точным измерением тока*

1. Установить на реохорде (поз. 2, рис. 7.1) указанную преподавателем длину провода (поз. 5, рис.7.1).
2. Ручку «Регулировка тока» (поз. 11, рис. 7.1) на лицевой панели лабораторного устройства перевести в крайнее положение против часовой стрелки.
3. Включить лабораторное устройство, нажав кнопку «Сеть» (рис. 7.1, поз. 10).
4. С помощью кнопок коммутации реализовать схему, соответствующую рис. 7.2. Состояние кнопок на приборе (см. рис.7.1): кнопка 9 – отжата; кнопка 8 – нажата.
5. С помощью ручки «Регулировка тока» последовательно установить значения напряжений  $U_i$ : 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0 В. Снять соответствующие им показания миллиамперметра  $I_i$ . Полученные величины занести в табл. 7.1.

Таблица 7.1

$U_i, \text{В}$	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$I_i, \text{А}$					
$R_i, \text{Ом}$					
$\langle R_I \rangle, \text{Ом}$					
$\rho_l, \text{Ом}\cdot\text{м}$					

6. Рассчитать по формуле (7.1) значения активных сопротивлений  $R_i$  и занести их в табл. 7.1.
7. Определить среднее значение сопротивления проводника

$$\langle R_I \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i, \quad (7.4)$$

где  $N$  – число измерений.

8. Определить удельное электрическое сопротивление проводника  $\rho_l$  по формуле

$$\rho_l = R_I \frac{S}{l}, \quad (7.5)$$

где  $l$  – длина провода;  $S$  – площадь его поперечного сечения, которая вычисляется по указанному на установке диаметру провода.

*Задание 2. Определение сопротивления проводника с помощью вольтметра и амперметра с точным измерением напряжения*

1. Повторить п. 2 задания 1.
2. Кнопками коммутации лабораторного устройства реализовать схему, соответствующую рис. 7.3. Состояние кнопок на приборе (см. рис.7.1): кнопка 9 – нажата; кнопка 8 – нажата.
3. Повторить действия п. 5 задания 1. Полученные величины  $U_i'$  и  $I_i'$  занести в таблицу, аналогичную табл. 7.1.
4. Рассчитать по формуле (7.3) значения активных сопротивлений  $R_i'$  и занести их в таблицу.

5. Определить среднее значение сопротивления проводника  $\langle R_U' \rangle$  по формуле, аналогичной (7.4).
6. Определить удельное сопротивление проводника  $\rho_U'$  по формуле, аналогичной (7.5).

*Задание 3. Определение активного сопротивления проводника с помощью моста постоянного тока*

1. Кнопками коммутации лабораторного устройства реализовать схему, необходимую для измерения сопротивления с помощью моста постоянного тока (кнопка 8 (см. рис.7.1) – отжата).
2. Включить мост постоянного тока (инструкция по методике работы с мостом прилагается к лабораторной установке).
3. Измерить общее сопротивление  $R_\Sigma$  исследуемого проводника и коммутирующих проводов:  $R_\Sigma = R'' + R_{np}$ .
4. Установить подвижный контакт на реохорде в крайнее нижнее положение и измерить активное сопротивление коммутирующих проводов  $R_{np}$ .
5. По данным измерений определить активное сопротивление  $R''$  проводника по формуле

$$R'' = R_\Sigma - R_{np}$$

6. Найти удельное сопротивление проводника  $\rho''$  (по значению  $R''$ ).
7. Полученные величины удельных сопротивлений сравнить между собой, сделать выводы.

### Контрольные вопросы

*Вариант 1*

1. Что называется током проводимости? Сформулируйте условия его существования.
2. Сформулируйте правила Кирхгофа.
3. Запишите формулу для расчета электрического сопротивления проводника цилиндрической формы.

4. *Задача.* Сопротивление проволоки  $R = 81$  Ом. Ее разрезали на несколько равных частей и соединили эти части параллельно, вследствие чего сопротивление стало  $R_1 = 1$  Ом. На сколько частей разрезали проволоку?

*Ответ:* 9.

### *Вариант 2*

1. Какова причина электрического сопротивления проводников с точки зрения классической электронной теории? Какова истинная природа электрического сопротивления?
2. Сформулируйте закон Ома для однородного и неоднородного участков цепи, для замкнутой цепи.
3. Выведите формулу для расчета общего сопротивления резисторов, соединенных параллельно.
4. *Задача.* По медному проводнику сечением  $S = 0,64$  мм<sup>2</sup> течет ток  $I = 2,4$  А. Определить среднюю скорость направленного движения электронов, считая, что число свободных электронов в единице объема равно числу атомов  $n$  в единице объема проводника ( $\rho = 8,93 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $\mu = 6,4 \cdot 10^{-2}$  кг/моль).

*Ответ:*  $2,8 \cdot 10^{-4}$  м/с.

### *Вариант 3*

1. Дайте сравнительную характеристику методов определения сопротивления проводника, используемых в данной работе.
2. Какое явление называется сверхпроводимостью? Где оно применяется?
3. Выведите формулу для расчета общего сопротивления резисторов, соединенных последовательно.
4. *Задача.* Определить удельное сопротивление  $\rho$  проводника длиной  $l = 2$  м, если при напряжении  $U = 2$  В, приложенном к его концам, плотность тока в проводнике  $j = 10^6$  А/м<sup>2</sup>.

*Ответ:*  $10^{-6}$  Ом·м.

## Лабораторная работа № 2-08

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОТЫ ВЫХОДА ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ МЕТАЛЛА

*Цель работы* – исследование явления термоэлектронной эмиссии и определение работы выхода электронов из металла.

*Приборы и принадлежности:* вакуумный диод; регулируемый источник тока накала катода; регулируемый источник питания анодной цепи; измерительные приборы.

#### Описание лабораторной установки и методики измерений

Исследование термоэлектронной эмиссии и определение работы выхода электрона с поверхности металла выполняются на установке, схема которой представлена на рис. 8.1. Основным узлом

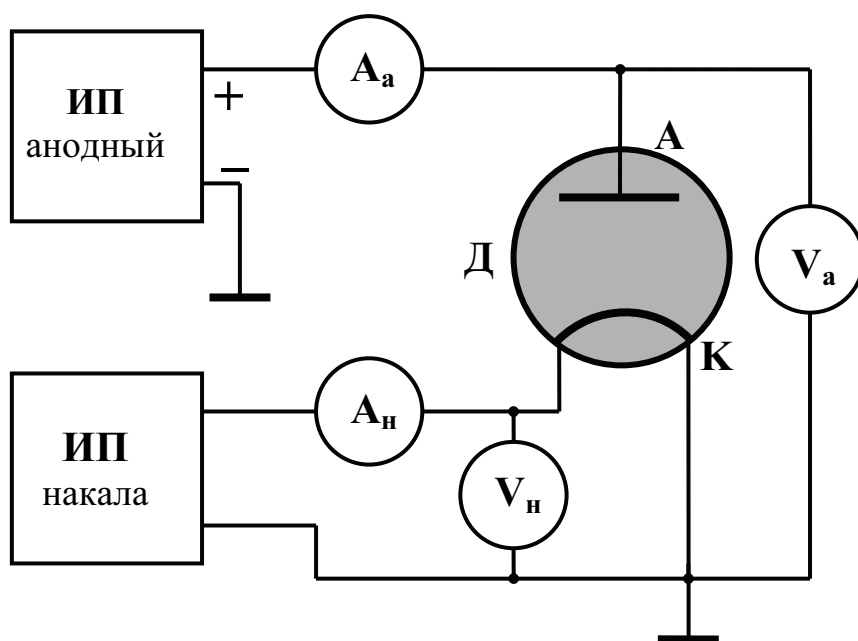


Рис. 8.1

установки является двухэлектродная вакуумная электронная лампа (вакуумный диод) Д. Вакуумный диод имеет два металлических электрода, запаянных в стеклянную колбу, из которой откачан воздух. Катод лампы К (отрицательный электрод) разогревается прямым пропусканием тока, силу которого можно регулировать

источником питания накала и контролировать соответствующими приборами. При этом температура катода  $T$  определяется подводимой электрической мощностью

$$P_n = I_n U_n, \quad (8.1)$$

где  $I_n$  – сила тока накала катода;  $U_n$  – напряжение накала.

С поверхности нагретого катода эмитируются электроны. Между катодом **К** и анодом **А** (положительным электродом) с помощью анодного источника питания создается электрическое поле. Меняя величину разности потенциалов между электродами (анодное напряжение), можно регулировать число термоэлектронов, которые достигают анода, т. е. силу анодного тока. Типичный вид зависимости анодного тока  $I_a$  от анодного напряжения  $U_a$  (вольт-амперная характеристика (ВАХ)) показан на рис. 8.2. На кривых имеется два характерных участка: **АВ** – участок, соответствующий наличию пространственного заряда электронов у поверхности катода; **СD** – участок тока насыщения.

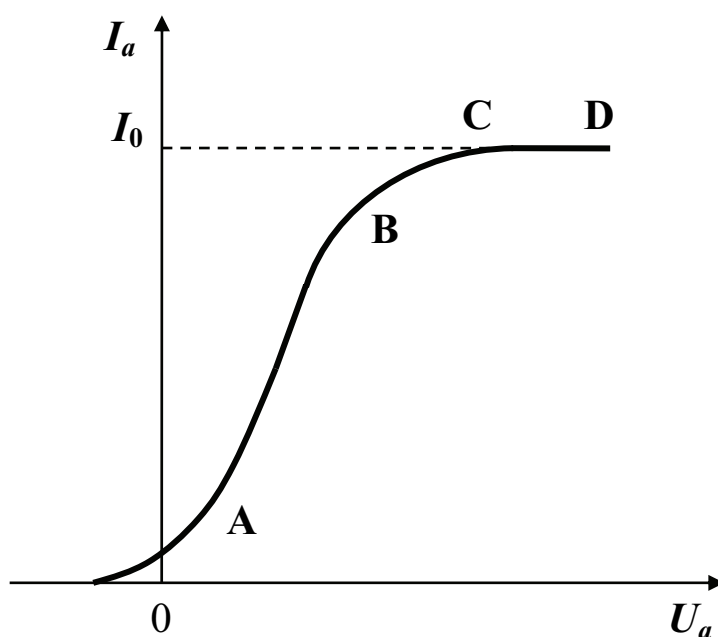


Рис. 8.2

Зависимость анодного тока от напряжения на участке **АВ** теоретически получена Богуславским и Ленгмюром:

$$I_a = \alpha U_a^{3/2},$$

где  $\alpha$  – константа, зависящая от формы электродов и геометрии межэлектродного пространства. Из этого соотношения видно, что зависимость анодного тока от анодного напряжения в условиях наличия пространственного заряда не подчиняется закону Ома.

В области насыщения анодного тока все электроны, эмитированные катодом, достигают анода. Значение тока насыщения  $I_0$  можно получить, продлив участок **CD** до оси ординат, проходящей через точку  $U_a = 0$  В.

Величина силы тока насыщения характеризует эмиссионную способность катода и зависит от температуры. Вид этой зависимости описывается законом Ричардсона–Дэшмана:

$$I_0 = AST^2 \exp\left(-\frac{A_{\text{вых}}}{kT}\right), \quad (8.2)$$

где  $A = 1,2 \cdot 10^6$  А/(м<sup>2</sup>К<sup>2</sup>) – постоянная Ричардсона–Дэшмана;  $S$  – площадь поверхности катода;  $T$  – температура катода;  $k$  – постоянная Больцмана;  $A_{\text{вых}}$  – работа выхода электрона с поверхности катода.

Определив экспериментально силу тока насыщения  $I_0$  и температуру катода и преобразовав формулу (8.2), можно рассчитать работу выхода:

$$A_{\text{вых}} = kT \ln\left(\frac{AST^2}{I_0}\right). \quad (8.3)$$

### Порядок выполнения работы

1. Проверить правильность подключения элементов лабораторной установки по схеме, изображенной на рис. 8.1. Ручки регулировки напряжения в источниках питания должны быть выведены в крайнее положение против часовой стрелки.
2. Включить источник питания накала катода и установить силу тока накала  $I_n$  в диапазоне 0,9...1,05 А. Измерить вольтметром величину напряжения накала  $U_n$  на панели источника питания.
3. По формуле (8.1) вычислить мощность накала катода  $P_n$ . Пользуясь графиком, приведенным на рабочем месте, с помощью полученной величины  $P_n$  определить температуру катода  $T$ .



4. Включить источник анодного напряжения. Меняя значение анодного напряжения  $U_a$  от 0 до 150 В с шагом 10 В, измерить силу анодного тока  $I_a$ . Результаты измерений занести в табл. 8.1.

Таблица 8.1

$U_a$ , В	0	10	20	...
$I_a$ , мА				

5. Повторить измерения, аналогичные пп. 2 – 4, при другом значении силы тока накала из данного диапазона.
6. Результаты измерений занести в таблицу, подобную табл. 8.1.
7. Используя полученные данные, на одном графике построить две ВАХ для различных температур и определить значения силы тока насыщения  $I_0(T)$ .
8. По формуле (8.3) вычислить соответствующие значения работы выхода  $A_{вых}$  и найти их среднюю величину (величина площади поверхности катода  $S$  дана на рабочем месте).
9. Проанализировать полученные результаты, сделать выводы.

### Контрольные вопросы

#### Вариант 1

1. Что называется термоэлектронной эмиссией, где она используется?
2. Нарисуйте и объясните ВАХ вакуумного диода.
3. Каковы причины возникновения области пространственного заряда у поверхности термокатода?
4. *Задача.* Определить работу выхода электрона с поверхности катода, если в вакуумном диоде при температуре катода 2000 К плотность тока насыщения  $j_{нас} = 0,12 \text{ А/см}^2$ .

*Ответ:*  $A_{вых} = 3,81 \text{ эВ}$ .

#### Вариант 2

1. Что называется работой выхода электрона?
2. Почему зависимость  $I(U)$  в вакуумном диоде не подчиняется закону Ома?
3. Что характеризует величина тока насыщения в вакуумном диоде? От чего она зависит?

4. *Задача.* Температуру накала вольфрамового катода в вакуумном диоде увеличили в 1,2 раза. Во сколько раз увеличится плотность тока насыщения, если начальная температура была равна 2000 К, а работа выхода для вольфрама  $A_{\text{вых}} = 4,5$  эВ.

*Ответ:* в 111,33 раза.

*Вариант 3*

1. Движением каких заряженных частиц обусловлен электрический ток в вакуумном диоде? Какие процессы являются источником этих частиц?
2. Запишите закон Богуславского–Ленгмюра. В чем его отличие от закона Ома? Чем оно вызвано?
3. Объясните механизм термоэлектронной эмиссии. Какие факторы влияют на процесс эмиссии электронов?
4. *Задача.* Катод вакуумного диода выполнен из молибдена. Температура катода  $T = 1723$  °С. Сколько электронов эмитируется за секунду с  $1 \text{ см}^2$  поверхности катода? Работа выхода для молибдена  $A_{\text{вых}} = 4,27$  эВ.

*Ответ:*  $N = 5,33 \cdot 10^{16}$ .

## Лабораторная работа № 2-09

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВТОРИЧНОЙ ЭМИССИИ

*Цель работы* – изучение динатронного эффекта в вакуумном триоде и определение коэффициента вторичной эмиссии электронов.

*Приборы и принадлежности:* вакуумный триод; источник тока накала катода; регулируемые источники питания анодной и сеточной цепей; измерительные приборы.

#### Описание лабораторной установки и методики измерений

При бомбардировке электронами проводящих материалов наблюдается эмиссия электронов с их поверхности. Электроны, бомбардирующие поверхность, называются первичными. Эмитированные электроны называются вторичными, а данное явление – вторичной электронной эмиссией. Для выхода вторичного элек-

трона с поверхности материала первичный электрон должен передать ему энергию, превышающую работу выхода. Поэтому вторичная эмиссия начинается лишь при определенных значениях энергии первичных электронов. Количество вторичных электронов зависит от природы материала, состояния поверхности, энергии первичных электронов и угла их падения. Для характеристики вторичной эмиссии вводится коэффициент  $k$ , равный отношению числа вторичных электронов  $N_2$  к числу первичных  $N_1$ :

$$k = \frac{N_2}{N_1}. \quad (9.1)$$

Коэффициент вторичной эмиссии может быть как меньше, так и больше единицы.

Наличие вторичной электронной эмиссии используется в работе электронных ламп с управляющим электродом (сеткой). Влияние вторичной эмиссии на характеристики электронных ламп называется динаatronным эффектом.

В данной работе на примере трехэлектродной лампы (триода) исследуется влияние вторичных электронов на анодную и сеточную вольт-амперные характеристики (ВАХ). Исследования проводятся на установке, электрическая схема которой представлена на рис. 9.1. Для питания сеточной и анодной цепей используются источники постоянного напряжения. Нагрев катода  $K$  лампы осуществляется косвенно с помощью нити накала  $H$ , по которой пропускается переменный ток постоянной величины (источник питания нити накала на схеме не показан). Напряжение в цепи сетки  $C$  регулируется потенциометром  $R_c$ , а в цепи анода  $A$  – потенциометром  $R_a$ . Силы анодного  $I_a$  и сеточного  $I_c$  токов регистрируются миллиамперметрами  $A_a$  и  $A_c$  соответственно. Разности потенциалов между катодом и сеткой  $U_c$  и между катодом и анодом  $U_a$  регистрируются вольтметрами  $V_c$  и  $V_a$  соответственно.

Рассмотрим изменение анодного  $I_a$  и сеточного  $I_c$  токов в триоде при изменении анодного напряжения  $U_a$ . Пусть напряжение на сетке имеет постоянную положительную величину (например  $U_c = 100$  В). Типичный вид анодной (кривая 1) и сеточной (кривая 2) ВАХ показан на рис. 9.2. Первичные электроны, эмитируемые из катода, ускоряются электрическим полем в межэлектродном зазоре лампы и попадают либо на анод, либо на сетку,

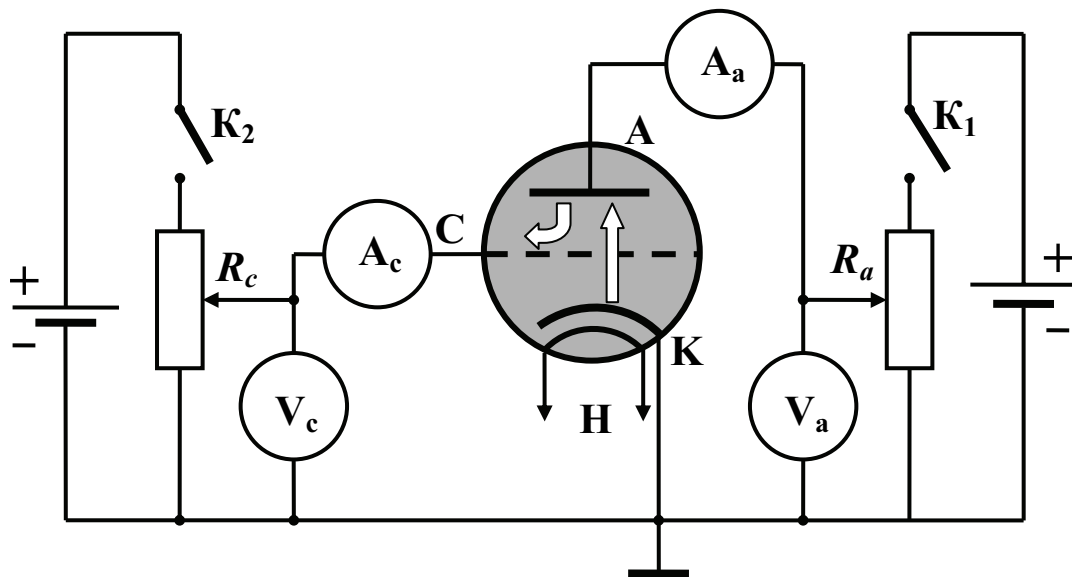


Рис. 9.1

создавая соответственно анодный или сеточный ток. В зависимости от соотношения анодного и сеточного напряжений величины этих токов могут меняться, но их сумма будет постоянной величиной, равной полному току эмиссии:

$$I_e = I_c + I_a. \quad (9.2)$$

Когда анодное напряжение  $U_a = 0$ , ток сетки равен полному току

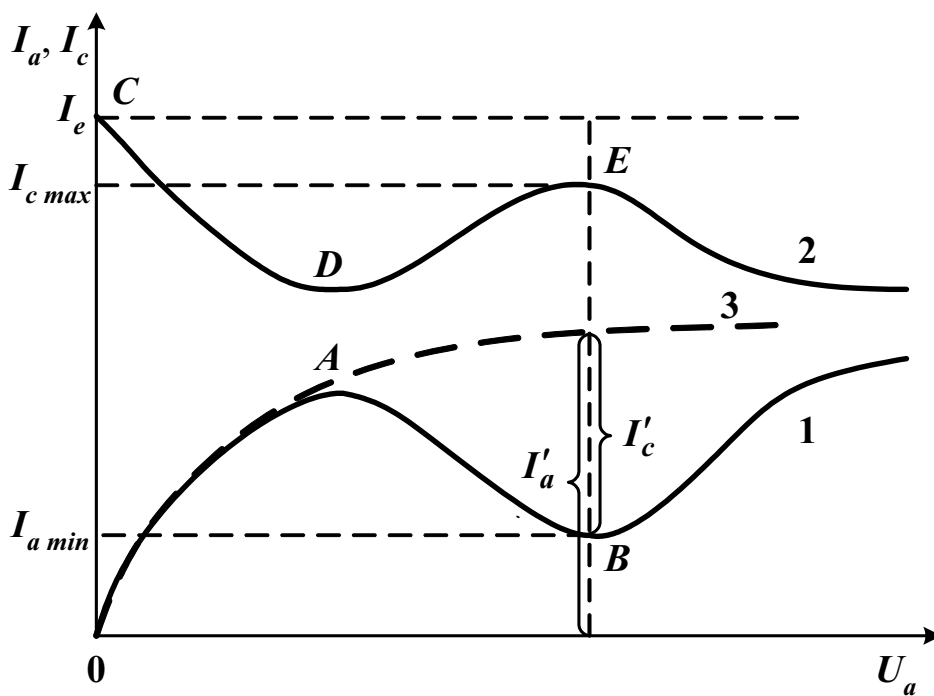


Рис. 9.2

эмиссии (все первичные электроны собираются сеткой). При увеличении анодного напряжения разность потенциалов между сеткой и анодом  $\Delta\varphi = U_c - U_a$  уменьшается и часть первичных электронов начинает достигать анода. Эти электроны обладают малыми кинетическими энергиями, недостаточными для выбивания вторичных электронов при бомбардировке анода. Дальнейший рост анодного напряжения приводит к увеличению как числа первичных электронов, достигающих анода, так и величины их кинетической энергии. На аноде начинается процесс вторичной электронной эмиссии. Так как потенциал сетки больше потенциала анода, вторичные электроны движутся в направлении сетки. Это приводит к росту сеточного (участок **DE** кривой 2, рис. 9.2) и падению анодного (участок **AB** кривой 1) токов. Таким образом, в триоде появляются два встречных потока: поток первичных электронов на анод и поток вторичных электронов на сетку (их направления показаны стрелками на рис. 9.1).

На рис. 9.2 пунктиром показана анодная ВАХ в отсутствие вторичной эмиссии (кривая 3). При напряжении  $U_a$ , соответствующем минимальному значению анодного тока  $I_{a \min}$  (точка В на кривой 1), ток первичных электронов от катода к аноду определяется величиной  $I'_a$ , а ток вторичных электронов от анода к сетке – величиной  $I'_c$ . Так как сила тока пропорциональна числу электронов, проходящих на электрод лампы в единицу времени, то выражение (9.1) для коэффициента вторичной эмиссии можно записать в виде

$$k = \frac{I'_c}{I'_a}.$$

Ввиду того, что величины этих токов измерить нельзя, на практике коэффициент вторичной электронной эмиссии определяют по отношению  $I_{c \max}$  к полному току эмиссии  $I_e$  (см. рис. 9.2):

$$k = \frac{I_{c \max}}{I_e}. \quad (9.3)$$

## Порядок выполнения работы

1. Установить ручки регулировки напряжения в источниках питания в крайнее положение против часовой стрелки.
2. Включить питание лабораторной установки. Включить ключ  $K_2$  и потенциометром  $R_c$  установить величину напряжения на сетке  $U_c = 100$  В. В ходе измерений следить за ее постоянством.
3. Включить ключ  $K_1$  и, увеличивая анодное напряжение  $U_a$  потенциометром  $R_a$  (в интервале  $0 \dots 10$  В с шагом 2 В, а в интервале  $10 \text{ В} \dots 100$  В с шагом 10 В), измерить силы анодного  $I_a$  и сеточного  $I_c$  токов. Данные, полученные в ходе измерений, занести в табл. 9.1.
4. Используя полученные данные, на одном графике построить две зависимости  $I_a = f(U_a)$  и  $I_c = f(U_a)$  при постоянном значении  $U_c = 100$  В.
5. Используя построенные зависимости и выражение (9.3), вычислить значение коэффициента вторичной эмиссии  $k$ .

Таблица 9.1

$U_a, \text{ В}$	0	2	...	10	20	...
$I_a, \text{ мА}$						
$I_c, \text{ мА}$						

6. Проанализировать полученные результаты, сделать выводы.

## Контрольные вопросы

### Вариант 1

1. Что называется вторичной электронной эмиссией?
2. Дайте определение работы выхода электрона с поверхности материала.
3. Почему при малых значениях анодного напряжения в триоде, по сравнению с напряжением на сетке, динаatronный эффект не наблюдается?

4. *Задача.* Какое максимальное число вторичных электронов  $N_{max}$  может выбить электрон с поверхности анода, выполненного из никеля, если электрон ускорен разностью потенциалов  $\Delta\phi = 100$  В? Работа выхода электрона из никеля равна 4,84 эВ.

*Ответ:*  $N_{max} = 20$ .

*Вариант 2*

1. Дайте определение коэффициента вторичной электронной эмиссии. От чего он зависит?
2. Какое явление называют динаatronным эффектом?
3. Почему при изменении напряжения на аноде полный эмиссионный ток остается постоянным? Чем он определяется?
4. *Задача.* В вакуумном триоде электрон, пролетающий сетку, имеет кинетическую энергию  $W_k = 8 \cdot 10^{-18}$  Дж. Будет ли наблюдаться вторичная электронная эмиссия на аноде, если задерживающая разность потенциалов между анодом и сеткой  $\Delta\phi = 20$  В? Анод изготовлен из тантала ( $A_{вых} = 4,12$  эВ).

*Ответ:* будет.

## Лабораторная работа № 2-10

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

*Цель работы* – определение удельного заряда электрона.

*Приборы и принадлежности:* вакуумный диод; регулируемый источник тока накала катода; регулируемый источник питания анодной цепи; измерительные приборы.

#### Описание лабораторной установки и методики измерений

Удельным зарядом элементарной частицы называется отношение заряда частицы к ее массе. В данной работе определение удельного заряда электрона проводится методом магнетрона. В этом методе используются особенности движения заряженных частиц в скрещенных электрическом и магнитном полях. Экспери-

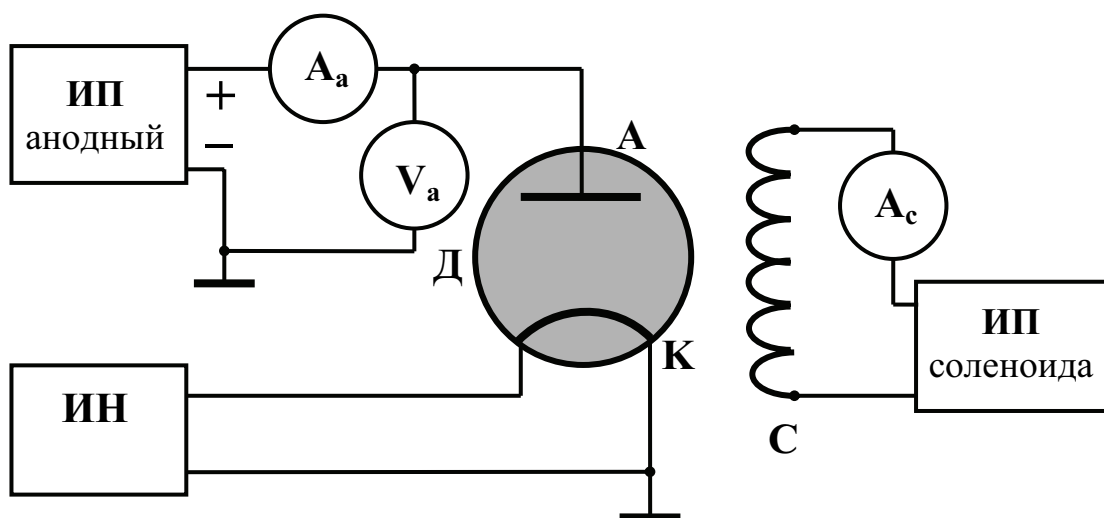


Рис. 10.1

мент проводится на установке, схема которой показана на рис. 10.1. Основным элементом установки является вакуумный диод Д с коаксиальными цилиндрическими электродами: катодом К и анодом А (рис. 10.2). Электроды помещены в стеклянную колбу, откачанную на вакуум. Катод разогревается прямым пропусканием тока накала постоянной силы от источника питания ИН. С поверхности нагретого катода происходит термоэмиссия электронов, которые у поверхности катода образуют электронное облако (область пространственного заряда). Размеры этой области меняются в зависимости от разности потенциалов между катодом и анодом и в условиях эксперимента сравнимы с размерами катода. Эмитированные электроны в области пространственного заряда движутся хаотически, и их распределение по скоростям соответствует распределению Максвелла. Под действием внешнего радиального электрического поля (его силовые линии показаны на рис.10.2), создаваемого электродами лампы, электроны «вытягиваются» из облака и ускоряются по направлению к аноду. Величина напряженности электрического поля в межэлектродном пространстве определяется выражением

$$E = -\frac{U_a}{r \ln \frac{r_a}{r_k}}, \quad (10.1)$$



где  $U_a$  – разность потенциалов между анодом и катодом (анодное напряжение);  $r_a$  и  $r_k$  – радиусы анода и катода соответственно;  $r$  – расстояние от оси системы до исследуемой точки.

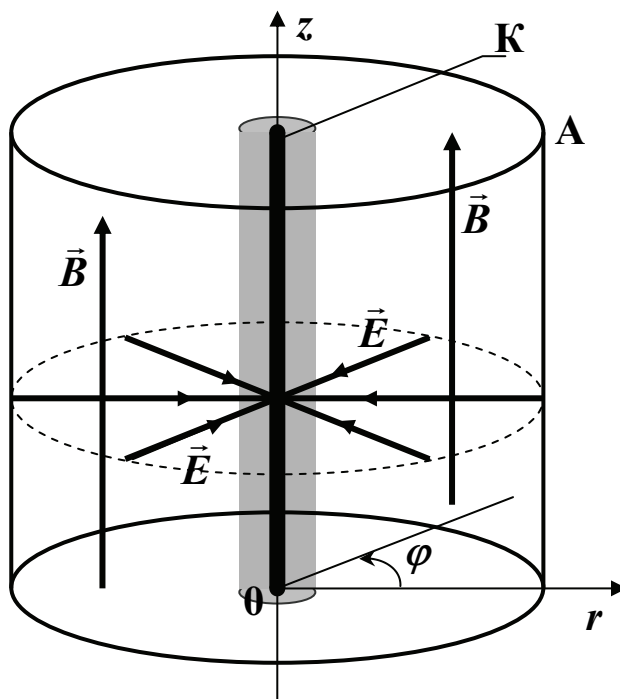


Рис. 10.2

Вакуумный диод помещен в середину соленоида С. При пропускании электрического тока в соленоиде возникает магнитное поле. Величина магнитной индукции  $B$  регулируется изменением тока соленоида  $I_c$ .

Для описания движения электрона в зазоре между коаксиальными цилиндрическими электродами удобно использовать цилиндрическую систему координат  $(r, \varphi, z)$  (см. рис. 10.2).

Со стороны электрического поля на электрон, имеющий заряд  $q$ , будет действовать сила  $F_e$ , направленная вдоль радиуса системы. Радиальная составляющая этой силы

$$F_{er} = qE, \quad (10.2)$$

остальные составляющие отсутствуют:  $F_{e\varphi} = F_{ez} = 0$ .

Со стороны магнитного поля, силовые линии которого направлены вдоль оси  $z$ , на электрон, движущийся со скоростью  $v$ , действует сила Лоренца. Проекция этой силы в цилиндрической системе координат будут

$$F_{mz} = 0, F_{m\varphi} = -q v_r B_z, F_{mr} = q v_\varphi B_z. \quad (10.3)$$

Положим, что начальная скорость движения электрона у поверхности катода равна нулю. Тогда электрон под действием этих сил будет двигаться только в плоскости  $(r, \varphi)$ . Решив задачу о движении электрона, получим

$$v_\varphi = \frac{qB}{2m} \left( 1 - \frac{r_k^2}{r^2} \right). \quad (10.4)$$

Поскольку сила Лоренца работу не совершает, а работа силы, действующей на электрон со стороны электрического поля, приводит к приращению его кинетической энергии, можно записать

$$qU_a = \frac{m}{2} (v_r^2 + v_\varphi^2),$$

или, учитывая (10.4),

$$qU_a = \frac{m}{2} \left( v_r^2 + \frac{q^2 B^2}{4m^2 r^2} (r^2 - r_k^2) \right). \quad (10.5)$$

Рассмотрим траекторию движения электрона в межэлектродном зазоре при разности потенциалов  $U_a$  (рис. 10.3).

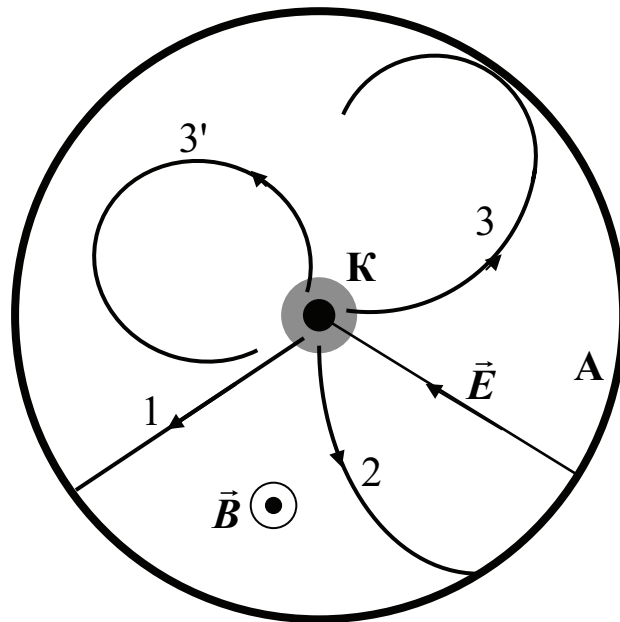


Рис. 10.3

В отсутствие магнитного поля электрон движется прямолинейно вдоль радиуса системы (траектория 1). При увеличении

магнитной индукции  $B$  траектория искривляется (траектория 2) и с некоторого критического значения магнитной индукции  $B_{кр}$  радиус кривизны траектории становится мал настолько, что электрон, не касаясь анода, возвращается на катод (траектории 3 и 3'). Очевидно, что при  $B = B_{кр}$  радиальная составляющая скорости электрона обращается в ноль и выражение (10.5) принимает вид

$$qU_a = \frac{q^2 B_{кр}^2}{8mr_a^2} (r_a^2 - r_k^2)^2. \quad (10.6)$$

Таким образом, измерив величину  $B_{кр}$ , можно с помощью формулы (10.6) определить удельный заряд электрона:

$$\frac{q}{m} = \frac{8U_a r_a^2}{B_{кр}^2 (r_a^2 - r_k^2)^2}. \quad (10.7)$$

Ток в вакуумном диоде обусловлен движением термоэлектронов от катода к аноду. При величине магнитной индукции больше критического значения электроны перестают попадать на анод и ток в лампе прекращается. На рис. 10.4 показана зависимость тока диода  $I_a$  от величины магнитной индукции  $B$ . Пунктирная кривая соответствует случаю, когда начальная скорость электронов у поверхности катода равна нулю, как и предполагалось

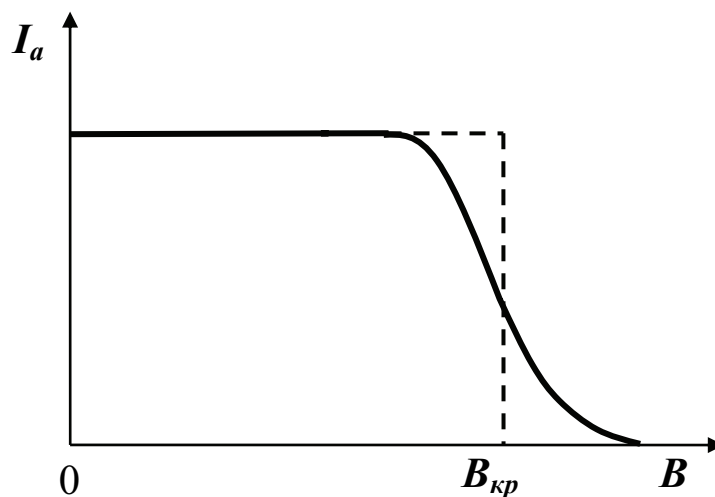


Рис. 10.4

ранее. Однако в реальном случае, при максвелловском распределении электронов по скоростям, критические условия достигаются для разных электронов при разных величинах магнитной индук-

ции. Зависимость  $I_a(B)$  в этом случае имеет вид кривой, изображенной на рис. 10.4 сплошной линией.

Неидеальная коаксиальность электродов лампы, соосность электродов лампы и соленоида, а также ряд других факторов приводят к дополнительному сглаживанию кривой. Тем не менее при хорошем исполнении оборудования установки перелом функции  $I_a(B)$  остается достаточно резким для определения критической величины магнитной индукции.

### Порядок выполнения работы

1. Проверить правильность подключения элементов лабораторной установки по схеме, изображенной на рис. 10.1. Ручки регулировки напряжения в источниках анодного напряжения и питания соленоида должны быть выведены в крайнее положение против часовой стрелки.
2. Включить лабораторный стенд.
3. Включить источник анодного напряжения и установить значение  $U_a$ , указанное на установке (одновременно включится и накал катода лампы). Дать прогреться установке не менее пяти минут. При проведении измерений в ходе лабораторной работы следить за постоянством анодного напряжения.
4. Включить источник питания соленоида. Изменяя силу тока в соленоиде от нуля до максимально возможного значения, снять зависимость силы анодного тока от силы тока в соленоиде  $I_a(I_c)$ .
5. По полученным данным построить график зависимости  $I_a(I_c)$ .
6. По графику определить критическое значение тока соленоида  $I_{скр}$ , при котором наблюдается наибольший наклон кривой  $I_a(I_c)$ .
7. Для найденного значения  $I_{скр}$  рассчитать критическое значение магнитной индукции  $B_{кр}$  по формуле

$$B_{кр} = k I_{скр}.$$

Значение константы  $k$  указано на установке.

8. По формуле (10.7) вычислить величину удельного заряда электрона.
9. Проанализировать полученные результаты, сделать выводы.

## Контрольные вопросы

### Вариант 1

1. Запишите выражение для силы, действующей на заряженную частицу в электрическом поле.
2. Объясните, почему сила Лоренца не совершает работу.
3. Электрон влетает в однородное магнитное поле под острым углом к силовым линиям. Нарисуйте его траекторию. Поясните полученный рисунок.
4. *Задача.* Протон и электрон, двигаясь с одинаковой скоростью, влетают в однородное магнитное поле перпендикулярно силовым линиям. Во сколько раз радиус кривизны  $R_1$  траектории протона больше радиуса кривизны  $R_2$  траектории электрона?

*Ответ:*  $R_1/R_2 = 1836$ .

### Вариант 2

1. Напишите выражение для силы Лоренца.
2. Как определяется работа силы, действующей на заряженную частицу в электрическом поле?
3. Протон влетает в однородные электрическое и магнитное поля, скрещенные под прямым углом, вдоль силовой линии электрического поля. Нарисуйте траекторию его движения. Объясните рисунок.
4. *Задача.* Циклотрон предназначен для ускорения протона до энергии 5 МэВ. Каким должен быть радиус  $R$  дуантов циклотрона, если магнитная индукция  $B = 1$  Тл?

*Ответ:*  $R > 0,32$  м.

### Вариант 3

1. Запишите выражение для силы, действующей на заряженную частицу, движущуюся в скрещенном электрическом и магнитном полях.
2. В однородное магнитное поле вдоль силовой линии влетает  $\alpha$ -частица. Объясните поведение частицы, нарисуйте ее траекторию.
3. Приведите примеры использования в технике особенностей движения заряженных частиц в скрещенных электрическом и магнитном полях.

4. *Задача.* Электрон влетает в однородное магнитное поле перпендикулярно силовым линиям. Найти угловую скорость вращения электрона по окружности, если магнитная индукция  $B = 2 \cdot 10^{-2}$  Тл.  
*Ответ:*  $\omega = 3,5 \cdot 10^9$  рад/с.

## Лабораторная работа № 2-11

### ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТА ХОЛЛА

*Цель работы* – определение постоянной Холла и концентрации носителей тока в полупроводнике.

*Приборы и принадлежности:* полупроводниковая пластина из кремния **Пл**; гальванометр **G**; ключ измерительной цепи **K**; источник рабочего тока пластины **ИП<sub>0</sub>**; источник питания электромагнита **ИП<sub>эм</sub>**; реостат цепи питания пластины **R<sub>0</sub>**; реостат цепи питания электромагнита **R<sub>эм</sub>**; амперметры **A<sub>0</sub>** и **A<sub>эм</sub>** в цепях питания пластины и электромагнита соответственно; переключатели направления тока **П<sub>0</sub>** и **П<sub>эм</sub>** в цепях питания пластины и электромагнита соответственно.

### Описание установки и вывод рабочей формулы

Лабораторная установка, электрическая схема которой приведена на рис. 11.1, предназначена для изучения эффекта Холла в полупроводниковых материалах. В установке используются три электрические цепи: цепь питания пластины; цепь питания электромагнита; измерительная цепь.

В цепях питания пластины и электромагнита предусмотрена возможность регулирования и контроля величины тока, переключатели **П<sub>0</sub>** и **П<sub>эм</sub>** позволяют изменять направление этих токов. В измерительной цепи используется гальванометр магнитоэлектрической системы со средним нулевым положением, что дает возможность измерять разность потенциалов обеих полярностей с определением её знака.

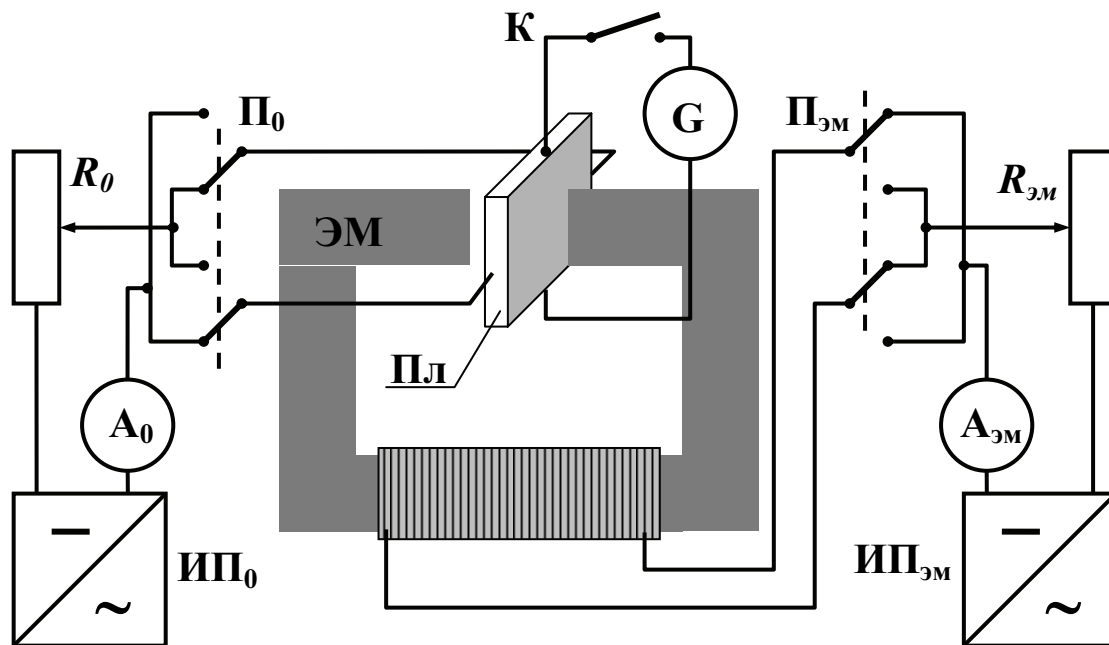


Рис. 11.1

Эффект Холла заключается в том, что в проводнике с током, помещенном в магнитное поле, силовые линии которого перпендикулярны направлению тока, возникает поперечная разность потенциалов (ее также называют холловской разностью потенциалов). Получим выражение для холловской разности потенциалов. Рассмотрим однородную пластину, вдоль которой течет электрический ток (рис. 11.2). Пусть носителями тока в пластине являются электроны. Под действием электрического поля электроны движутся упорядоченно в направлении, противоположном вектору напряженности электрического поля  $\vec{E}$ . В этом случае все точки поперечного сечения пластины будут иметь одинаковый потенциал, поэтому можно выбрать на противоположных гранях пластины любые точки (обозначим их **C** и **D**), для которых  $U_{CD} = 0$ . При включении в месте расположения пластины магнитного поля с магнитной индукцией  $\vec{B}$  на электроны будет действовать сила Лоренца

$$\vec{F}_л = q[\vec{v}, \vec{B}],$$

отклоняя электроны от их прямолинейного движения. Вследствие этого произойдет перераспределение электронов в пластине: в со-

ответствии с направлениями тока и магнитного поля, заданными на рис. 11.2, концентрация электронов в верхней части пластины уменьшится, а в нижней – увеличится. Такое перераспределение электронов будет сопровождаться появлением поперечной разности потенциалов  $U_{CD}$  (поперечного электрического поля напряженностью  $\vec{E}_H$ ). Поперечное электрическое поле напряженностью  $\vec{E}_H$  приведет к появлению кулоновской силы  $\vec{F}_e = e\vec{E}_H$ , которая

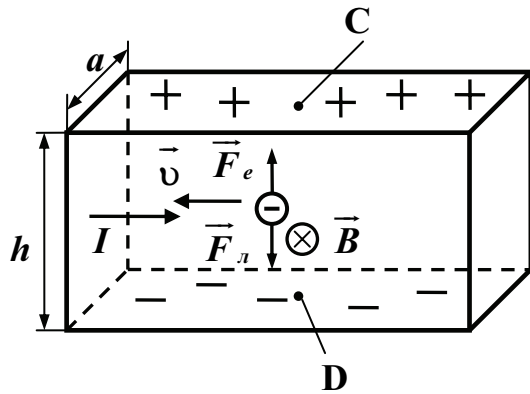


Рис. 11.2

будет направлена противоположно силе Лоренца. Когда напряженность этого поля достигнет такого значения, что его действие на электроны будет уравновешивать силу Лоренца, совместное действие кулоновской силы и силы Лоренца обеспечит динамическое равновесие в поперечном движении электронов. При этом величины этих сил будут равны и

значение  $E_H$  можно определить из соотношения

$$eE_H = evB, \quad (11.1)$$

где  $v$  – скорость упорядоченного движения электронов;  $e$  – заряд электрона.

Для однородного изотропного материала пластины величина напряженности поперечного электрического поля  $E_H$  связана с поперечной разностью потенциалов между точками **C** и **D** соотношением

$$U_{CD} = E_H h,$$

где  $h$  – расстояние между точками **C** и **D** (высота пластины). С учетом соотношения (11.1) получим

$$U_{CD} = vBh. \quad (11.2)$$

Согласно классической теории электропроводности средняя скорость упорядоченного движения электронов

$$\langle u \rangle = \frac{j}{ne}, \quad (11.3)$$

где  $j$  – плотность тока;  $n$  – концентрация носителей тока в пластине. По определению, плотность тока



$$j = \frac{I}{S}, \quad (11.4)$$

где  $S = ah$  – площадь поперечного сечения пластины;  $a$  – ее ширина. Полагая  $\langle u \rangle \approx v$  и учитывая (11.3) и (11.4), выражение (11.2) можно записать так:

$$U_{CD} = \frac{IB}{nea} = R \frac{IB}{a}. \quad (11.5)$$

В этом выражении коэффициент пропорциональности  $R = \frac{1}{ne}$  называется постоянной Холла.

Таким образом, поперечная разность потенциалов, регистрируемая при эффекте Холла, возникает благодаря особенностям движения заряженных частиц в скрещенных электрическом и магнитном полях. Ее величина прямо пропорциональна силе тока, протекающего по образцу, величине магнитной индукции и обратно пропорциональна концентрации носителей тока в образце.

Носители тока могут быть как отрицательными (электроны), так и положительными (дырки). Если носителями тока в образце являются дырки, то ситуация оказывается подобной описанной выше, только теперь при тех же направлениях тока и силовых линий магнитного поля не электроны, а дырки отклоняются к нижней грани и знак разности потенциалов меняется на противоположный. Таким образом, определив знак холловской разности потенциалов, можно установить тип носителей тока в полупроводниках, а на основании полученного экспериментально численного значения постоянной Холла

$$R = \frac{U_{CD}a}{IB} \quad (11.6)$$

определить концентрацию носителей тока по формуле

$$n = \frac{1}{eR}. \quad (11.7)$$

### Порядок выполнения работы

1. Установить переключатели  $\Pi_0$ ,  $\Pi_{эм}$  и ключ  $\mathbf{K}$  в положение «1».

**Внимание!** Тумблеры  $\Pi_0$  и  $\Pi_{эм}$  можно переключать только при

отсутствии тока в соответствующих цепях, а именно при отключенных источниках питания.

2. Включить источник питания тока пластины  $\text{ИП}_0$  и с помощью реостата  $\mathbf{R}_0$  установить силу тока  $I$  через пластину (ее величина указана на установке).
3. Включить источник питания электромагнита  $\text{ИП}_{\text{эм}}$ .
4. С помощью потенциометра  $\mathbf{R}_{\text{эм}}$  увеличить силу тока электромагнита  $I_{\text{эм}}$  до величины, значение которой указано на установке. При этом зафиксировать количество делений  $N_1$ , на которое сместится «зайчик» гальванометра.
5. Повторить измерения при противоположном направлении магнитного поля (переключатель  $\mathbf{П}_{\text{эм}}$  установить в положение «2») и зафиксировать значение  $N_2$ . Вычислить среднее значение  $\langle N \rangle$ .
6. Повторить измерения пп. 4, 5 при другой величине силы тока электромагнита  $I_{\text{эм}}$ , значение которой также указано на установке.
7. С помощью графика зависимости  $\mathbf{B} = f(I_{\text{эм}})$ , который имеется на рабочем месте, определить величину магнитной индукции поля  $\mathbf{B}$ , которая соответствует значению тока питания электромагнита  $I_{\text{эм}}$ .
8. Рассчитать холловскую разность потенциалов  $U_X$  по формуле

$$U_{CD} = C_V \langle N \rangle,$$

где  $C_V$  – постоянная гальванометра (ее значение указано на установке).

9. Вычислить постоянную Холла  $\mathbf{R}$  по формуле (11.6) и концентрацию носителей тока  $n$  по формуле (11.7).
10. Сделать выводы.

## Контрольные вопросы

### *Вариант 1*

1. Какая сила действует на заряд, движущийся в магнитном поле? Запишите выражение для этой силы и перечислите ее свойства.

2. Используя классическую теорию электропроводности металлов, объясните эффект Холла (выведите формулу для холловской разности потенциалов).
3. Запишите выражение для постоянной Холла. Какую информацию можно получить, вычислив постоянную Холла для данного образца?
4. *Задача.* Электрон с энергией  $W = 103$  эВ влетает в однородное электрическое поле напряженностью  $E = 800$  В/см перпендикулярно к силовым линиям поля. Какими должны быть величина и направление магнитной индукции  $\mathbf{B}$ , чтобы электрон не отклонялся от своего первоначального направления движения?

*Ответ:*  $\mathbf{B} = 1,32 \cdot 10^{-2}$  Тл.

### *Вариант 2*

1. Объясните суть эффекта Холла и приведите примеры его применения.
2. Получите выражение для радиуса кривизны траектории и периода обращения заряда, движущегося со скоростью  $\vec{v}$  в магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$ , если  $\vec{v} \perp \vec{B}$ . Какова траектория движения заряда в этом случае?
3. Выведите выражение для силы Лоренца, используя закон Ампера.
4. *Задача.* Электрон, ускоренный разностью потенциалов  $\Delta\varphi = 10^5$  В, влетает в однородное магнитное поле перпендикулярно силовым линиям. Найти радиус траектории электрона и частоту его обращения по орбите, если магнитная индукция поля  $\mathbf{B} = 2$  Тл.

*Ответ:*  $R = 0,53$  мм,  $\nu = 5,6 \cdot 10^{10}$  об/с.

### *Вариант 3*

1. Запишите выражение для силы, действующей на заряд со стороны электростатического поля, и объясните, как определить ее направление.

2. Совершает ли работу сила Лоренца? Ответ поясните.
3. Получите выражение для радиуса кривизны траектории и периода обращения заряда, движущегося со скоростью  $\vec{v}$  в магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$ , если  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$  образуют угол  $0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$ . Какова траектория движения заряда в этом случае?
4. *Задача.* В однородное магнитное поле с магнитной индукцией  $B = 0,8$  Тл помещена медная пластинка, по которой течет ток  $I = 5$  А. Магнитная индукция  $\vec{B}$  перпендикулярна плоскости пластинки. Толщина пластинки  $a = 1$  мм. Определить концентрацию свободных электронов в меди, если поперечная разность потенциалов на пластинке  $U = 2$  мкВ.  
*Ответ:*  $n = 1,25 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ .

## Лабораторная работа № 2-12

### ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНоиДА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНОЙ ПОСТОЯННОЙ

*Цель работы* – исследование магнитной индукции поля на оси соленоида и определение магнитной постоянной.

*Приборы и принадлежности:* соленоид с бифилярной обмоткой; источник переменного тока; амперметр; зонд для измерения магнитной индукции; милливольтметр.

#### Описание лабораторной установки и методики измерений

Соленоид представляет собой полый цилиндр длиной  $l$  и диаметром  $D$ , на боковую поверхность которого равномерно намотано  $N$  витков провода (рис. 12.1). Бифилярная обмотка наматывается одновременно двумя проводами, получаются две совмещенные обмотки, которые могут подключаться к источнику питания как последовательно, так и параллельно.

Когда по одной обмотке течет ток силой  $I$ , внутри соленоида и в его окрестностях возникает магнитное поле. Величина магнитной индукции этого поля на оси соленоида (точка  $O$ )

$$B = \frac{\mu\mu_0}{2} nI(\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2), \quad (12.1)$$

где  $n = \frac{N}{l}$  – число витков на единицу длины соленоида;  $\mu$  – магнитная проницаемость среды, в которой находится соленоид;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} = 12,566 \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная. Для бесконечно длинного соленоида ( $D \ll l$ )  $\cos \alpha_1 \approx \cos \alpha_2 \approx 1$ , тогда

$$B = \mu\mu_0 nI. \quad (12.2)$$

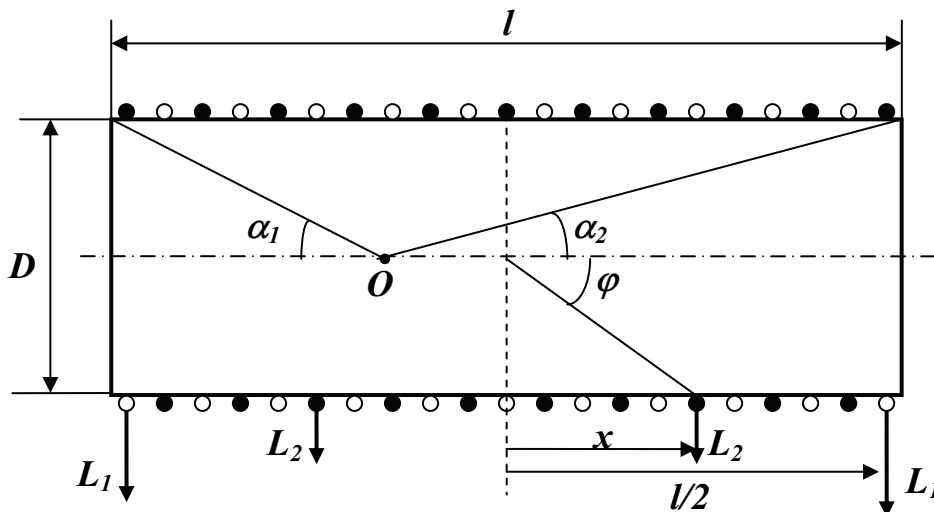


Рис. 12.1

В данной работе используется соленоид, описанный выше. Диаметр соленоида  $D = 50$  мм, длина  $l = 406$  мм. Обе обмотки содержат по  $N = 190$  витков. Среда немагнитная:  $\mu = 1$ . Одна из обмоток ( $L_1$ ) имеет только крайние выводы, вторая ( $L_2$ ) имеет промежуточные выводы в точках, расположенных симметрично относительно центра соленоида (точки  $O$ ) на расстоянии  $x$ . Таким образом, подключая источник тока к различным парам выводов соленоида  $L_2$ , можно менять его длину. В табл. 12.1 приведены параметры соленоида  $L_2$ .

Таблица 12.1

Номера клемм (от центра влево и вправо)	Число вит- ков	$x$ , мм	$\cos \varphi$
1	5	11	0,403
2	10	22	0,660
3	20	43	0,865
4	30	63	0,929
5	50	106	0,973
6	70	148	0,986
7	95	203	0,993

Величина магнитной индукции  $B$  поля на оси соленоида определяется с помощью зонда, представляющего собой индукционную катушку, в которой индуцируется переменное напряжение  $U$  под действием переменного магнитного поля. При этом

$$B = \kappa U, \quad (12.3)$$

где  $\kappa = 1,227 \cdot 10^{-2}$  Тл/В – коэффициент пропорциональности.

На рис. 12.2 показана схема установки. С источника питания ИП

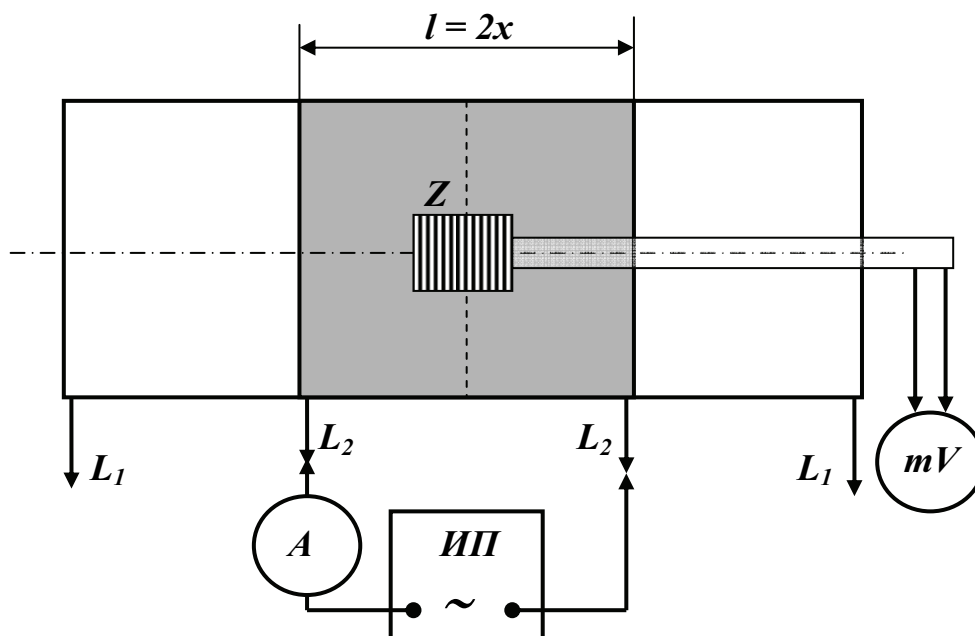


Рис. 12.2

на соответствующую обмотку соленоида подается переменное напряжение, величина которого может регулироваться. В соленоиде возникает ток, силу которого измеряют амперметром. Ток создает магнитное поле в пространстве соленоида. Магнитную индукцию поля измеряют с помощью зонда  $Z$ , который расположен в центре соленоида.

### Порядок выполнения работы

#### Задание 1. Изучение магнитного поля соленоида

1. Собрать схему, изображенную на рис. 12.2. Проверить расположение зонда (он должен находиться в середине соленоида).
2. Источник питания подключить к выводам 1 соленоида  $L_2$  (см. табл. 12.1) и установить в цепи соленоида ток  $I = 1 \dots 1,5$  А.
3. С помощью милливольтметра измерить напряжение зонда.
4. Повторить измерения, подключая источник питания последовательно к остальным парам выводов соленоида  $L_2$ . **Внимание!** В момент переключения проводов источник питания должен быть отключен! Измерения проводить при одинаковом значении тока соленоида.
5. Результаты измерений занести в табл. 12.2.

Таблица 12.2

Номер клеммы	Длина включенной части соленоида $l = 2x$ , мм	Напряжение зонда $U$ , мВ	Магнитная индукция $B_{эксп}$ , Тл	Магнитная индукция $B_{теор}$ , Тл
1				
2				
...				
7				

6. По формуле (12.3) найти соответствующие значения магнитной индукции  $B_{эксп}$ .

7. По формуле (12.1) вычислить соответствующие теоретические значения магнитной индукции  $B_{теор}$  и занести в таблицу. (В этом задании  $\alpha_1 = \alpha_2 = \varphi$ .)

8. Построить графики зависимостей  $B_{эксп}$  и  $B_{теор}$  от длины соленоида  $l$ . Сравнить экспериментальную и теоретическую кривые и сделать выводы.

9. Вычислить значение магнитной индукции по формуле (12.2). Сравнить полученный результат с результатом п. 8 и оценить соотношение длины и диаметра соленоида, при котором последний можно считать бесконечно длинным.

*Задание 2. Определение магнитной постоянной*

1. Подключить источник питания к выводам соленоида  $L_1$  (рис. 12.2).
2. Изменяя силу тока  $I$  в цепи соленоида от 0 до 1,6 А с шагом 0,2 А, найти значения магнитной индукции в центре соленоида (используйте методику, описанную ранее). Данные занести в табл. 12.3.
3. Соединить обмотки соленоидов  $L_1$  и  $L_2$  последовательно, для чего левый вывод обмотки  $L_1$  соединить с крайним правым выводом обмотки  $L_2$ . Ко вторым выводам обмоток подключить источник питания ИП. При таком соединении соленоидов число витков на единицу длины  $n$  увеличивается в 2 раза.
4. Повторить измерения, описанные в п. 2.

Таблица 12.3

$I, A$	0	0,2	0,4	0,6	...	....	...	1,6
$U, мВ$								
$B, Тл$								

5. Построить на одном графике зависимости  $B(I)$  для обоих случаев. Сделать выводы.
6. Для каждой зависимости при значении силы тока  $I = 1,5 A$  найти коэффициент пропорциональности  $a = \frac{B}{nI}$  и сравнить его с магнитной постоянной  $\mu_0$ .

*Задание 3. Исследование пространственного распределения магнитного поля вдоль оси соленоида*

1. Подключить источник питания ИП к клеммам «5» соленоида  $L_2$ . Установить ток в обмотке силой  $I = 1,5 A$ .
2. Перемещая зонд  $Z$  от центра соленоида с шагом 2 см, записать показания милливольтметра. Результаты измерений занести в табл. 12.4.



Таблица 12.4

$x$ , см	0	2	4	6	8	10
$U$ , мВ						
$B$ , Тл						

3. По формуле (12.3) вычислить соответствующие значения магнитной индукции. Построить график зависимости  $B(x)$ .

### Контрольные вопросы

#### Вариант 1

1. Что такое магнитное поле? Дайте определение его характеристик.
2. Сформулируйте и запишите теорему о циркуляции вектора магнитной индукции для магнитного поля в вакууме (закон полного тока). Каков ее физический смысл?
3. Что называется соленоидом, какими параметрами определяется его магнитное поле? В чем отличие магнитных полей, создаваемых коротким и длинным соленоидами?
4. *Задача.* Ток силой  $I = 20$  А, протекая по кольцу из медной проволоки ( $\rho_m = 1,7 \cdot 10^{-8}$  Ом·м) сечением  $S = 1,0$  мм<sup>2</sup>, создает в центре кольца напряженность магнитного поля  $H = 178$  А/м. Какая разность потенциалов  $U$  приложена к концам проволоки, образующей кольцо?

*Ответ:*  $U = 0,12$  В.

#### Вариант 2

1. Дайте определение силовой линии магнитного поля. Изобразите графически магнитные поля прямолинейного тока, кругового тока, длинного соленоида.
2. Выведите выражение для напряженности магнитного поля бесконечно длинного соленоида.
3. Приведите примеры использования соленоидов в технике.
4. *Задача.* В однородном магнитном поле перпендикулярно силовым линиям расположен виток площадью  $S = 10$  см<sup>2</sup>. Найти силу тока в витке, если напряженность магнитного поля уменьша-

ется с постоянной скоростью 1 А/м за одну секунду. Сопротивление витка  $R = 1$  Ом.

Ответ:  $I = 1,26 \cdot 10^{-9}$  А.

*Вариант 3*

1. Дайте сравнительную характеристику электростатического и магнитного полей.
2. Сформулируйте и запишите закон Био–Савара–Лапласа. Как направлен вектор магнитной индукции поля  $d\vec{B}$ , созданного элементом тока  $I d\vec{l}$  в исследуемой точке пространства?
3. В чем заключается явление электромагнитной индукции? Как оно используется в данной работе?
4. *Задача.* Найти величину магнитной индукции поля на средней линии тороида, имеющего  $N = 100$  витков. Внешний диаметр тороида  $d_1 = 30$  см, внутренний –  $d_2 = 20$  см. По тороиду течет электрический ток силой  $I = 5$  А.

Ответ:  $B = 7,98 \cdot 10^{-7}$  Тл.

## Лабораторная работа № 2-13

### ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНОИДА И СИСТЕМЫ ДВУХ СОЛЕНОИДОВ

*Цель работы* – исследование магнитной индукции поля на оси короткого соленоида, проверка закона Био–Савара–Лапласа и принципа суперпозиции полей.

*Приборы и принадлежности:* два одинаковых коротких соленоида; источник переменного тока; амперметр; зонд для измерения магнитной индукции; милливольтметр.

#### Описание лабораторной установки и методики измерений

Исследование магнитного поля соленоида и системы двух соленоидов проводится на установке, схема которой представлена на рис. 13.1. Два соленоида (катушки)  $K_1$  и  $K_2$  имеют одинаковые

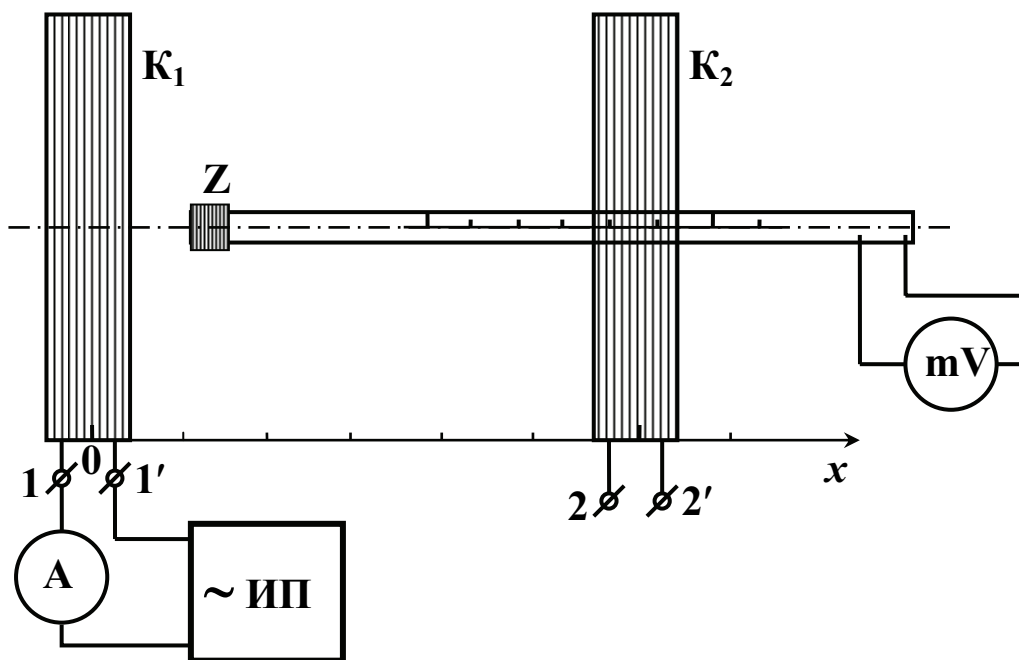


Рис. 13.1

параметры: средний радиус обмотки  $R = 6,5$  см, длина соленоидов  $l = 2,5$  см, число витков  $N = 290$ . Соленоид  $K_1$  неподвижен, соленоид  $K_2$  может перемещаться вдоль оси  $x$  системы. Расстояние между центрами катушек определяют по шкале на стенде. Для измерения магнитной индукции используется зонд  $Z$ , который может двигаться вдоль оси соленоидов. Положение зонда (координата  $x$  точки, в которой измеряется магнитная индукция) определяется по шкале на его держателе.

В основе методики измерения магнитной индукции лежит явление электромагнитной индукции. Зонд представляет собой малого размера катушку с большим числом витков (в данном случае число витков катушки зонда 1500). Если зонд поместить в переменное магнитное поле, в нем будет индуцирована ЭДС, которая определяется по закону Фарадея–Ленца:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Psi_m}{dt} = -NS\frac{dB}{dt},$$

где  $\Psi$  – потокосцепление;  $S$  – площадь сечения катушки зонда;  $N$  – число ее витков.

В данной работе по соленоиду пропускают переменный синусоидальный ток промышленной частоты (50 Гц). Возникает переменное магнитное поле. Магнитная индукция этого поля

$$B(t) = B_{max} \cos(\omega t + \varphi_0),$$

где  $B_{max}$  – амплитудное значение магнитной индукции.

Тогда 
$$\frac{dB}{dt} = -\omega B_{max} \sin(\omega t + \varphi_0)$$

и в зонде, расположенном в окрестностях соленоида, индуцируется ЭДС

$$\mathcal{E} = NS\omega B_{max} \sin(\omega t + \varphi_0),$$

где  $NS\omega B_{max} = \mathcal{E}_0$  – ее амплитудное значение. ЭДС зонда измеряется с помощью милливольтметра, который показывает эффективное значение этой величины:

$$U = \frac{\mathcal{E}_0}{\sqrt{2}} = \frac{NS\omega}{\sqrt{2}} B_{max}.$$

Таким образом, измеряя величину  $U$  зонда, можно найти амплитудное значение магнитной индукции в точке поля, где расположен зонд:

$$B_{max} = \frac{\sqrt{2}}{NS\omega} U.$$

Выражение для магнитной индукции поля на оси кругового тока можно получить, используя закон Био–Савара–Лапласа и принцип суперпозиции полей:

$$B = \frac{\mu_0 IR^2}{2(R^2 + x^2)^{3/2}}, \quad (13.1)$$

где  $R$  – радиус кругового тока;  $x$  – расстояние от центра кругового тока до точки наблюдения  $A$  (рис. 13.2). Магнитная индукция в центре кругового тока ( $x = 0$ )

$$B_0 = \frac{\mu_0 I}{2R}. \quad (13.2)$$

С учетом (13.2) уравнение (13.1) можно переписать в виде

$$B = B_0 \frac{R^3}{(R^2 + x^2)^{3/2}}. \quad (13.3)$$

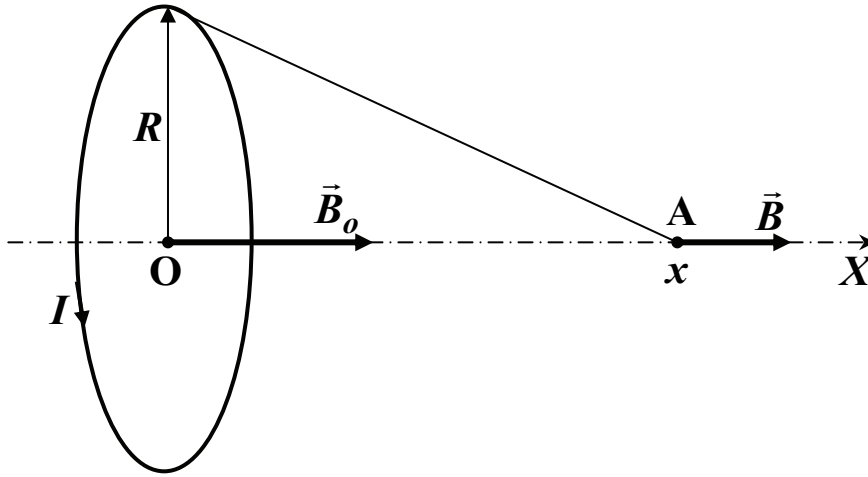


Рис. 13.2

Когда длина соленоида  $l$  значительно меньше его диаметра (короткий соленоид), магнитное поле, создаваемое им, приближенно равно магнитному полю витка с током силой  $I_{\text{витка}} = NI_{\text{соленоида}}$ , где  $N$  – число витков соленоида. Поэтому магнитная индукция на оси соленоида может быть приближенно определена по формуле (13.3). Определив экспериментально зависимость

$$\left( \frac{B(x)}{B_0} \right)_{\text{экс}} = \frac{U(x)}{U_0} \quad (13.4)$$

( $U(x)$  – эффективное значение ЭДС зонда в точке с координатой  $x$ ) и сравнив ее с функцией

$$f(x) = \left( \frac{B(x)}{B_0} \right)_{\text{теор}} = \frac{R^3}{(R^2 + x^2)^{3/2}}, \quad (13.5)$$

можно сделать вывод о справедливости предположений.

Для проверки принципа суперпозиции полей используется два коаксиальных коротких соленоида  $K_1$  и  $K_2$  (см. рис. 13.1). По принципу суперпозиции магнитная индукция результирующего поля системы двух соленоидов будет

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2. \quad (13.6)$$

В случае, если соленоиды коаксиальны и направление тока в них одинаково,  $\vec{B}_1$  и  $\vec{B}_2$  в точках на оси системы совпадают по направлению. Тогда выражение (13.6) можно переписать в виде

$$B(x) = B_1(x) + B_2(x), \quad (13.7)$$

то есть величина магнитной индукции результирующего поля на оси системы равна сумме магнитных индукций полей каждого соленоида.

Данное утверждение можно проверить, измерив значения магнитной индукции полей отдельно взятых соленоидов в различных точках на оси системы и просуммировав полученные зависимости по формуле (13.7). Полученный теоретический результат можно сравнить с экспериментальной величиной магнитной индукции результирующего поля двух соленоидов.

### Порядок выполнения работы

#### Задание 1. Изучение магнитного поля соленоида

1. Подключить источник питания к клеммам «1» и «1'» катушки  $K_1$  и установить в цепи ток силой  $I = 1$  А.
2. Проверить расположение зонда (он должен находиться в середине соленоида  $K_1$ , что соответствует координате  $x = 0$  см) и подключить его к милливольтметру.
3. С помощью милливольтметра измерить напряжение зонда  $U_I(x)$ .
4. Повторить измерения, смещая зонд вдоль оси соленоида с шагом 2 см. Результаты измерений занести в табл. 13.1.
5. С учетом формулы (13.4) вычислить соответствующие отношения  $\frac{B_1(x)}{B_0}$ . Результаты занести в табл. 13.1. Здесь  $B_1(0) = B_0$ .

Таблица 13.1

$x$ , см	0	2	4	6	...	...	...	16
$U_1$ , мВ								
$\frac{B_1(x)}{B_0}$	1							
$f(x)$								

6. Для всех значений  $x$  из табл. 13.1 вычислить соответствующие значения функции  $f(x)$  (формула 13.5) и занести в таблицу ( $R = 6,5$  см).

7. На одной системе координат построить графики зависимостей  $\frac{B_1(x)}{B_0}$  и  $f(x)$ . Сравнить кривые и сделать выводы.

*Задание 2. Изучение магнитного поля системы двух соленоидов.*

*Проверка принципа суперпозиции полей*

1. Подключить источник питания к выводам «2» и «2'» катушки  $K_2$  (см. рис. 13.1).

2. Установить силу тока  $I$  в цепи соленоида 1 А. Провести измерения напряжения зонда  $U_2(x)$  и рассчитать отношение  $\frac{B_2(x)}{B_0}$  для

катушки  $K_2$  аналогично пп. 2 –5 предыдущего задания, занести данные в табл. 13.2.

3. Отключить источник питания.

4. Соединить обмотки катушек  $K_1$  и  $K_2$  последовательно (при этом важно, чтобы направление тока в катушках было одинаково). Схема подключения дана на рабочем месте. Подключить источник питания и установить силу тока в цепи катушек 1 А.

5. Провести измерения  $U_{1+2}(x)$  и расчеты  $\frac{B_{1+2}(x)}{B_0}$  по методике, описанной в п. 2, занести данные в табл. 13.2.

Таблица 13.2

$x$ , см	0	2	4	6	...	...	...	16
$U_2$ , мВ								
$\frac{B_2(x)}{B_0}$								
$U_{1+2}$ , мВ								
$\frac{B_{1+2}(x)}{B_0}$								

6. Построить на одном графике зависимости  $\frac{B_1(x)}{B_0}$ ,  $\frac{B_2(x)}{B_0}$ ,  $\frac{B_{1+2}(x)}{B_0}$ .

7. На этой же системе координат построить график зависимости  $\frac{B_1(x) + B_2(x)}{B_0}$  результирующего поля двух соленоидов, полученной теоретически сложением (на графике) соответствующих ординат функций  $\frac{B_1(x)}{B_0}$  и  $\frac{B_2(x)}{B_0}$ .

8. Сравнить теоретическую и экспериментальную кривые результирующего поля. Сделать выводы.

### Контрольные вопросы

#### Вариант 1

1. Сформулируйте и запишите закон Био–Савара–Лапласа. Сделайте пояснительный рисунок.
2. Получите выражение для магнитной индукции на оси витка с током.
3. Какое явление лежит в основе метода измерения магнитной индукции, используемого в данной работе?
4. *Задача.* Ток силой  $I = 30$  А течет по длинному проводу, согнутому под углом  $\alpha = 56^\circ$ . Определить напряженность магнитного поля в точке, лежащей на биссектрисе угла, на расстоянии  $a = 5$  см от его вершины.

*Ответ:*  $H = 383$  А/м.

#### Вариант 2

1. Что такое магнитная индукция? Каков ее физический смысл?
2. Сформулируйте принцип суперпозиции полей. Запишите, как определяется магнитная индукция результирующего поля нескольких источников.



3. Используя закон полного тока, получите выражение для магнитной индукции бесконечно длинного соленоида.
4. *Задача.* По прямолинейному отрезку провода длиной  $l = 60$  см течет ток силой  $I = 30$  А. Найти магнитную индукцию поля в точке, равноудаленной от концов отрезка и находящейся на расстоянии  $r_0 = 20$  см от него.  
*Ответ:*  $B = 2,5 \cdot 10^{-5}$  Тл.

### *Вариант 3*

1. Что называют магнитным полем? Дайте его общую характеристику.
2. Запишите и сформулируйте теорему о циркуляции вектора  $\vec{B}$ . Каков ее физический смысл?
3. В чем заключается явление электромагнитной индукции? Каким законом оно описывается?
4. *Задача.* Электрический ток силой  $I = 1$  А течет по проводу, согнутому в форме квадрата со стороной  $a = 1$  м. Найти величину и направление магнитной индукции в центре квадрата.  
*Ответ:*  $B = 1,13 \cdot 10^{-6}$  Тл.

## Лабораторная работа № 2-14

### ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ МЕТОДОМ СТОЛЕТОВА

*Цель работы* – изучение баллистического метода Столетова и измерение величины напряженности магнитного поля между полюсами электромагнита с помощью этого метода.

*Приборы и принадлежности:* источник питания **ИП**; электромагнит **ЭМ**; длинный соленоид **С**; амперметр **А**; нормальная катушка **К<sub>1</sub>**; баллистическая катушка **К<sub>2</sub>**; баллистический гальванометр **Г**; переключатель источника питания **П**; переключатель цепи гальванометра **К**.

## Описание установки и вывод рабочей формулы

Для экспериментального определения напряженности магнитного поля применяются различные методы. В данной лабораторной работе используется одна из модификаций баллистического метода Столетова, которая основана на коммутации (включении и выключении) тока в намагничивающей цепи.

Схема лабораторной установки приведена на рис. 14.1. В ней

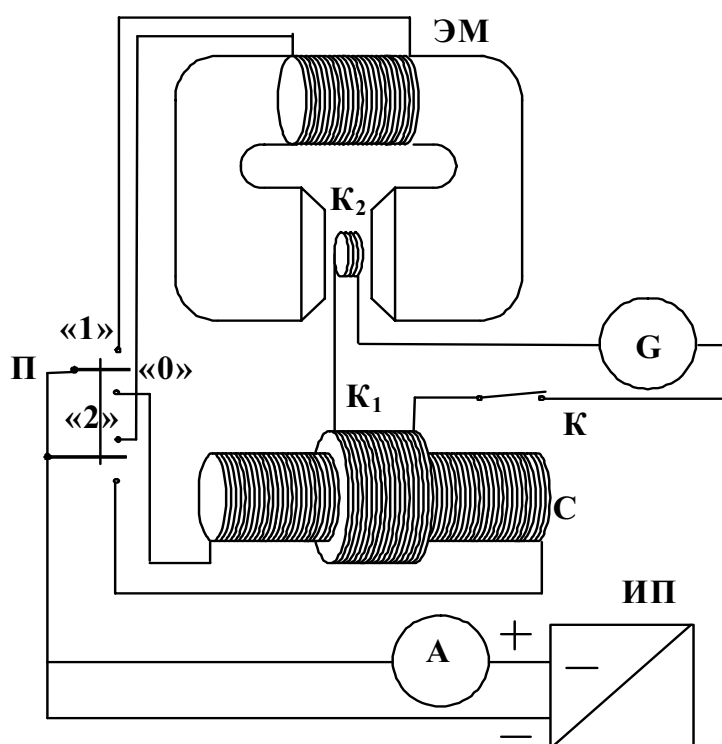


Рис.14.1

имеются три силовые цепи, которые питаются от единого источника **ИП**: цепь электромагнита **ЭМ**; цепь соленоида **С** и электрическая цепь гальванометра, в состав которой входят гальванометр **Г** и две катушки – нормальная **К<sub>1</sub>** и баллистическая **К<sub>2</sub>**. В работе необходимо измерить напряженность катушки **К<sub>2</sub>**, поэтому будем называть ее измерительной катушкой. Коммутация тока производится переключателем **П**, который осуществляет подачу питания от источника **ИП** на электромагнит (в положении 1) или на соленоид (в положении 2). У переключателя **П** существует еще и нейтральное положение 0, при котором обе цепи отключены.

Физическая сущность баллистического метода Столетова заключается в следующем. Баллистический гальванометр включается в цепь измерительной катушки  $K_2$ , которая располагается в исследуемом магнитном поле. При изменении магнитного потока  $\Phi_m$  сквозь поверхность поперечного сечения измерительной катушки в последней появляется индукционный ток (если цепь катушки замкнута). Величина заряда  $q$ , переносимого при этом в цепи гальванометра, пропорциональна изменению магнитного потока  $\Delta\Phi_m$ . Это позволяет на основании измерений величины заряда определить изменение магнитного потока  $\Delta\Phi_m$ , и, соответственно, связанное с этим изменение магнитной индукции  $\Delta B$  поля. В случае, когда начальное значение  $B_0$  известно, можно определить ее конечное значение  $B_k$  и наоборот.

Рассмотрим процессы, происходящие при изменении магнитного потока, пронизывающего поверхность поперечного сечения катушки  $K_2$ , и определим связь между изменением этого потока и переносимым в цепи гальванометра зарядом.

Магнитная индукция поля все время направлена перпендикулярно к плоскости поперечного сечения  $K_2$  и в начальный момент времени ее величина равна  $B_0$ . При изменении магнитной индукции поля происходит изменение магнитного потока, которое можно записать как

$$\Delta\Phi_m = \Phi_{mk} - \Phi_{m0} = (B_k - B_0)S_\delta, \quad (14.1)$$

где  $S_\delta$  – площадь поперечного сечения баллистической катушки  $K_2$ . Поскольку катушка  $K_2$  состоит из  $N_\delta$  витков, ЭДС индукции, которая индуцируется в  $K_2$ , будет

$$\mathcal{E}_i = -N_\delta \frac{d\Phi_m}{dt} = -\frac{d\Psi_m}{dt}, \quad (14.2)$$

где  $\Psi_m = N_\delta \Phi_m$  – потокосцепление катушки.

В электрической цепи гальванометра в этом случае будет протекать индукционный ток

$$I = \frac{\mathcal{E}_i}{R},$$

где  $R$  – полное сопротивление этой цепи.

По определению, сила электрического тока

$$I = \frac{dq}{dt},$$

следовательно, заряд  $dq$ , который протекает в цепи при элементарном изменении потокосцепления  $d\Psi_m$ , будет

$$dq = Idt = -\frac{d\Psi_m}{R}.$$

Интегрирование этого выражения дает связь между зарядом, переносимым в измерительной цепи, и изменением потокосцепления  $K_2$ :

$$q = -\int_{\Psi_{m0}}^{\Psi_{mk}} \frac{d\Psi_m}{R} = \frac{\Psi_{m0} - \Psi_{mk}}{R} = \frac{(\Psi_{m0} - \Psi_{mk})}{R}. \quad (14.3)$$

С учетом (14.1) – (14.3) получим

$$q = \frac{N_{\delta} S_{\delta}}{R} (B_0 - B_k). \quad (14.4)$$

Таким образом, экспериментально определить величину магнитной индукции  $B$  можно, измерив величину заряда  $q$ , который переносится при протекании индукционного тока в измерительной цепи, содержащей катушку  $K_2$ . Для этого дополнительно необходимо знать начальные или конечные характеристики поля и характеристики измерительной цепи. Так, из соотношения (14.4) при условии  $B_k = 0$  следует, что

$$B_0 = \frac{qR}{N_{\delta} S_{\delta}}. \quad (14.5)$$

Для баллистической катушки  $K_2$  количество витков  $N_{\delta}$  и ее площадь  $S_{\delta}$  известны, а неизвестным оказывается сопротивление электрической цепи гальванометра  $R$ . Непосредственные измерения этого сопротивления связаны с определенной технической трудностью и поэтому в работе осуществляется косвенное определение величины  $R$ , которое требует наличия дополнительной нормальной катушки  $K_1$  в измерительной цепи гальванометра. Эта катушка индуктивно связана с соленоидом. Подключение соленоида к источнику питания ИП осуществляется переводом переключателя П из нейтрального положения 0 в положение 2 и сопровождается появлением магнитного поля  $B_c$ , силовые линии которого про-

низывают поверхность поперечного сечения нормальной катушки  $K_1$ . При этом в цепи гальванометра переносится заряд  $q_c$ , который связан с магнитной индукцией поля соленоида. Использование в установке длинного соленоида, для которого  $B_c = \mu\mu_0 nI_c$ , позволяет записать соотношение (14.5) в виде

$$B_c = \frac{q_c R}{N_0 S_0} = \mu_0 \mu n I_c, \quad (14.6)$$

где  $N_0$  – количество витков в нормальной катушке;  $S_0$  – площадь поперечного сечения нормальной катушки;  $n$  – количество витков, приходящихся на единицу длины соленоида;  $I_c$  – сила тока, установившегося в цепи соленоида.

Из соотношения (14.6) для электрического сопротивления цепи гальванометра получим

$$R = \mu_0 \mu \frac{n I_c N_0 S_0}{q_c}.$$

Тогда на основании (14.5) можно вывести связь между магнитной индукцией  $B_m$  поля в зазоре электромагнита и зарядом  $q_m$ , переносимым в баллистической катушке при подключении или отключении электромагнита к источнику питания:

$$B_m = \mu_0 \mu \frac{N_0 S_0 n I_c}{N_0 S_0 q_c} q_m.$$

В обоих случаях измерения осуществляются одним и тем же баллистическим гальванометром, поэтому справедливо соотношение

$$\frac{q_m}{q_c} = \frac{m_m}{m_c},$$

где  $m_m$  и  $m_c$  – числа делений гальванометра, соответствующие величинам отбросов «зайчика» гальванометра для случаев магнита и соленоида. Тогда

$$B_m = \mu_0 \mu \frac{N_0 S_0 n I_c m_m}{N_0 S_0 m_c}. \quad (14.7)$$

Если ввести постоянную измерительной цепи

$$\beta = \frac{N_0 S_0 n I_c}{N_0 S_0 m_c}, \quad (14.8)$$

то соотношение (14.7) можно представить в виде  $B_m = \mu\mu_0\beta m_m$ .

Ввиду того, что напряженность магнитного поля связана с магнитной индукцией соотношением  $H = \frac{B}{\mu\mu_0}$ , справедлива формула

$$H_m = \beta m_m. \quad (14.9)$$

Единицу измерения  $\beta$  можно установить, используя (14.9):

$$[\beta] = \frac{A}{\text{м} \cdot \text{дел.}}$$

### Порядок выполнения работы

#### *Задание 1. Определение постоянной измерительной цепи*

1. Переключатель **П** установить в нейтральное положение, а ручки грубой и точной регулировки силы тока источника питания **ИП** перевести в крайнее левое положение против часовой стрелки.
2. Включить источник питания **ИП** в сеть.
3. Подключить **ИП** к соленоиду, переведя переключатель **П** в положение 2.
4. Установить значение силы тока  $I_c$ , протекающего через соленоид, которое указано на установке.
5. Зафиксировать абсолютное значение происходящего при этом отброса «зайчика» гальванометра  $m_1$  (в делениях шкалы). Затем переключатель **П** перевести в нулевое положение и снова зафиксировать абсолютное значение отброса «зайчика» гальванометра  $m_2$ .
6. Опыт проделать три раза и определить среднее значение  $\langle m_c \rangle$

по данным опытов (согласно формуле  $\langle m_c \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{n}$ ). Результаты измерений и вычислений занести в табл. 14.1.

7. Рассчитать значение постоянной измерительной цепи по формуле (14.8) (необходимые для расчета данные приведены на установке).

Таблица 14.1

Номер опыта	$m_{сi}$ , дел.	$\langle m_c \rangle$ , дел.	$I_c$ , А	$\beta, \frac{A}{m \cdot \text{дел.}}$
1				
2				
...				
6				

*Задание 2. Изучение зависимости напряженности магнитного поля электромагнита от силы тока в обмотке*

1. Подключить источник питания к электромагниту, установив переключатель **П** в положение 1.
2. Установить одно из значений силы тока, протекающего через электромагнит (значения силы тока указаны на установке).
3. Для этого значения силы тока провести измерения абсолютных величин отбросов «зайчика» гальванометра (при последовательном изменении положений переключателя **П**: 1 – 0 и 0 – 1, по аналогии с п. 5 задания 1).
4. Проведя опыт три раза, вычислить среднее значение  $\langle m_m \rangle$ . Результаты измерений и вычислений занести в табл. 14.2.
5. По формуле (14.9) рассчитать значение напряженности магнитного поля электромагнита  $H$ , соответствующее данному значению  $I_m$  (подставляя вместо  $m_m$  среднее значение  $\langle m_m \rangle$ ). Результаты вычислений занести в табл. 14.2.
6. Для каждого указанного на установке значения силы тока  $I_m$ , протекающего через электромагнит, провести измерения  $\langle m_m \rangle$  и  $H$  по аналогии с пп. 3–5.
7. Построить график зависимости напряженности магнитного поля в зазоре электромагнита от величины тока, протекающего через его обмотку:  $H = f(I_m)$ .

Таблица 14.2

$I_m, \text{ А}$	0,2					0,3					...				
$m_{mi}, \text{ дел.}$															
$\langle m_m \rangle,$ дел.															
$H, \text{ А /м}$															

### Контрольные вопросы

#### Вариант 1

1. В чем заключается явление электромагнитной индукции и как оно используется в данной работе?
2. Выведите формулу, позволяющую вычислить магнитную индукцию внутри бесконечно длинного соленоида.
3. Что называется потокосцеплением? В каких единицах оно измеряется?
4. *Задача.* Отрезок провода длиной  $l = 4$  м складывают вдвое и его концы замыкают. Затем его растягивают и придают ему форму квадрата, лежащего в горизонтальной плоскости. Какой максимальный заряд  $q$  пройдет при этом через провод, если его сопротивление  $R = 2$  Ом? Вертикальная составляющая магнитного поля Земли  $B = 50$  мкТл.

*Ответ:*  $q = 25$  мкКл.

#### Вариант 2

1. Чем создается магнитное поле? В чем отличие магнитного поля от электростатического?
2. Выведите формулу для величины заряда, протекающего в измерительной цепи в результате изменения магнитного потока.
3. Дайте определение магнитной индукции и напряженности магнитного поля, укажите физический смысл и единицы измерения этих величин.



4. *Задача.* Найти магнитный поток через поверхность, ограниченную одним витком бесконечно длинного соленоида с площадью поперечного сечения  $S = 10 \text{ см}^2$  при силе тока  $I = 20 \text{ А}$ . Плотность витков соленоида  $n = 10 \text{ см}^{-1}$ .  
*Ответ:*  $\Phi = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ Вб}$ .

### *Вариант 3*

1. Что называется магнитным потоком? Запишите формулу для вычисления магнитного потока. В каких единицах измеряется магнитный поток?
2. Сформулируйте закон электромагнитной индукции Фарадея и правило Ленца.
3. В чем заключается явление самоиндукции? Что называется индуктивностью контура? Назовите единицу измерения индуктивности.
4. *Задача.* Небольшая измерительная катушка площадью поперечного сечения  $S$  с количеством витков  $N$  соединена с баллистическим гальванометром и находится в однородном магнитном поле, магнитная индукция которого равна  $B$ . Ось катушки направлена вдоль поля. Катушка очень быстро поворачивается на  $180^\circ$ . Найти полный заряд, прошедший по цепи, если ее полное сопротивление  $R$ .

*Ответ:*  $q = \frac{2BNS}{R}$ .

## **Лабораторная работа № 2-15**

### **ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ**

*Цель работы* – экспериментальное исследование явления электромагнитной индукции и проверка закона Фарадея–Ленца.

*Приборы и принадлежности:* соленоид с двумя коаксиальными обмотками; генератор пилообразного напряжения; двухканальный осциллограф.

## Описание лабораторной установки и методики измерений

Схема установки, используемой в данной работе, представлена на рис. 15.1. В ее состав входит соленоид с двумя обмотками  $L_1$  и  $L_2$ , которые намотаны одна на другую. Параметры обмоток (длины  $l_1$ ,  $l_2$  и количество витков  $N_1$ ,  $N_2$ ) приведены на установке.

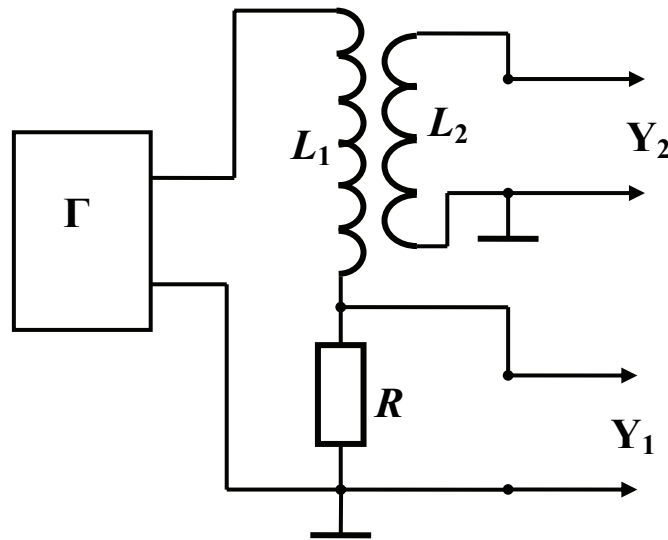


Рис. 15.1

С генератора  $\Gamma$  на обмотку соленоида  $L_1$  подается пилообразное напряжение частотой  $\nu = 500 \dots 1000$  Гц. При этом через обмотку соленоида и резистор  $R = 50$  Ом течет переменный ток (зависимость силы тока от времени имеет пилообразную форму). Магнитная индукция поля, созданного током силой  $I_1$  в обмотке  $L_1$ , будет

$$B_1 = \mu_0 \frac{N_1 I_1}{l_1}.$$

Потокосцепление обмотки  $L_2$ , создаваемое полем  $B_1$ ,

$$\Psi_{m2} = N_2 B_1 S = \mu_0 \frac{N_1 N_2}{l_1} S I_1,$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения соленоида. Если величина потокосцепления меняется с течением времени, то в обмотке  $L_2$  возникает ЭДС индукции, которая определяется по закону Фарадея–Ленца:

$$\mathcal{E}_i = - \frac{d\Psi_{m2}}{dt} = -\mu_0 \frac{N_1 N_2 S}{l_1} \frac{dI_1}{dt}. \quad (15.1)$$

Поскольку сила тока в первой обмотке пропорциональна падению напряжения на резисторе  $R$ , т.е.

$$I_1 = \frac{U_1}{R},$$

то выражение (15.1) можно записать в виде

$$\mathcal{E}_i = -\mu_0 \frac{N_1 N_2 S}{l_1 R} \frac{dU_1}{dt}. \quad (15.2)$$

Сравнивая величины  $\mathcal{E}_i$  и  $\frac{dU_1}{dt}$ , можно проверить справедливость закона электромагнитной индукции и правила Ленца.

Зависимость силы тока в обмотке  $L_1$  от времени исследуется с помощью осциллографа. На вход первого канала ( $Y_1$ ) осциллографа подается сигнал, равный падению напряжения  $U_1$  на резисторе, на вход второго канала ( $Y_2$ ) – ЭДС индукции, возникающая во второй обмотке  $L_2$ . Выбор пилообразной формы напряжения на первой обмотке связан с тем, что  $\mathcal{E}_i \sim \frac{dU_1}{dt}$  и равна постоянной величине в течение половины периода (см. рис. 15.2). В этом случае

выражение (15.2) можно переписать в виде

$$\mathcal{E}_i = -\mu_0 \frac{N_1 N_2 S}{l_1 R} \frac{\Delta U_1}{\Delta t}. \quad (15.3)$$

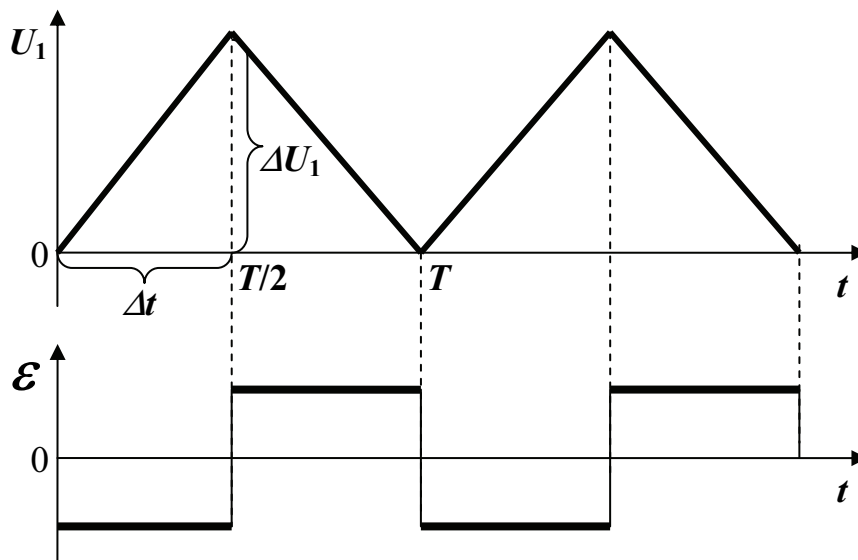


Рис.15.2

## Порядок выполнения работы

1. Проверить правильность подключения генератора и осциллографа и включить их питание. Установить на генераторе частоту выходного напряжения  $\nu_1 = 500$  Гц. При измерении частоты использовать осциллограф.

2. Добиться на экране осциллографа стабильной картинки, аналогичной рис. 15.2. Использовать для этого ручки регулировки масштабов по осям  $t$  (ось  $x$  – ручка временной развертки «ms/дел.») и  $U$  (ось  $y$  – ручка усилителя «V/дел.») и ручку «Стабилизация».

3. По осциллограммам определить величины  $\Delta U_1$ ,  $\mathcal{E}_{\text{эксн } 1}$  и интервал времени  $\Delta t$ , в течение которого напряжение на первом соленоиде изменяется на  $\Delta U_1$ .

4. Подставив величины  $\Delta U_1$  и  $\Delta t$  в формулу (15.3), вычислить среднее значение  $\langle \mathcal{E}_{\text{теор}} \rangle_1$ .

5. Сравнить полученные  $\mathcal{E}_{\text{эксн } 1}$  и  $\langle \mathcal{E}_{\text{теор}} \rangle_1$ .

6. Повторить измерения  $\mathcal{E}_{\text{эксн } 2}$  и  $\langle \mathcal{E}_{\text{теор}} \rangle_2$  при частоте пилообразного напряжения  $\nu_2 = 1000$  Гц. Сравнить полученные результаты.

7. Повторить те же измерения при частоте пилообразного напряжения  $\nu_3 = 500$  Гц, увеличив амплитуду пилообразного напряжения  $\Delta U_1$  в два раза. Сравнить полученные результаты для  $\mathcal{E}_{\text{эксн } 3}$  и  $\langle \mathcal{E}_{\text{теор}} \rangle_3$ .

8. Проверить равенство следующих отношений:  $\frac{\mathcal{E}_{\text{эксн } 2}}{\mathcal{E}_{\text{эксн } 1}}$  и  $\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}$ ,

$\frac{\mathcal{E}_{\text{эксн } 1}}{\mathcal{E}_{\text{эксн } 3}}$  и  $\frac{\Delta U_1}{\Delta U_3}$ . Сделать выводы.

## Контрольные вопросы

### Вариант 1

1. Дайте определение магнитного потока. Запишите выражение для магнитного потока через произвольную поверхность.

2. Сформулируйте правило Ленца.
3. Приведите примеры использования в технике явления электромагнитной индукции.

4. *Задача.* В круглом контуре радиусом  $R = 1$  м, расположенном в однородном переменном магнитном поле, индуцируется ЭДС

$\mathcal{E}_i = \pi t$ . Угол между нормалью к плоскости контура и магнитной индукцией  $\alpha = 60^\circ$ . Определить зависимость  $B(t)$ , если в момент времени  $t = 0$   $B_0 = 0$ .

*Ответ:*  $B = t^2$ .

*Вариант 2*

1. Что называется магнитным потоком? Каков его физический смысл?
2. Сформулируйте и запишите закон электромагнитной индукции.
3. Сформулируйте и запишите теорему Гаусса для магнитной индукции. Какую информацию о магнитном поле раскрывает эта теорема?
4. *Задача.* В однородном магнитном поле, магнитная индукция которого  $B = 0,06$  Тл, находится соленоид диаметром  $d = 8$  см, имеющий  $N = 80$  витков. Соленоид поворачивают на угол  $180^\circ$  за время  $\Delta t = 0,2$  с, так что его ось остается направленной вдоль силовых линий. Найти среднее значение ЭДС индукции, возникающей в соленоиде.

*Ответ:*  $\langle \mathcal{E} \rangle = 0,24$  В.

*Вариант 3*

1. Дайте определение потокосцепления.
2. Почему магнитный поток через замкнутую поверхность всегда равен нулю?
3. Почему в данной работе во втором соленоиде возникают прямоугольные импульсы напряжения?
4. *Задача.* Проволочный виток радиусом  $r = 4$  см, имеющий сопротивление  $R = 0,01$  Ом, находится в однородном магнитном поле. Плоскость рамки составляет угол  $\alpha = 30^\circ$  с силовыми линиями поля. Какой заряд протечет по витку, если магнитное поле исчезнет?

*Ответ:*  $q = 10^{-2}$  Кл.

## Лабораторная работа № 2-16

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛА МАГНИТНОГО НАКЛОНЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЗЕМНОГО ИНДУКТОРА

*Цель работы* – изучение баллистического метода и определение силовых характеристик естественного магнитного поля Земли с помощью этого метода.

*Приборы и принадлежности:* земной индуктор **ЗИ**; баллистический гальванометр **Г**.

#### Описание установки и вывод рабочей формулы

Известно, что Земля похожа на огромный магнит с магнитной осью, которая наклонена примерно на  $11,5^\circ$  относительно географической оси вращения Земли. Карта окружающего нас магнитного поля, построенная с помощью компаса, представляет собой ряд параллельных силовых линий, которые замкнуты, почти везде идут не горизонтально, а наклонены к поверхности Земли. Силовые линии магнитного поля Земли направлены с юга на север, поэтому северный магнитный полюс Земли *N* находится в области южного географического полюса *Ю*, а южный магнитный полюс *S* – в области северного географического полюса *С* (рис. 16.1).

Первоначально магнитное поле формируется в ядре Земли, где вещество находится в проводящем состоянии. Здесь возможны перемещения вещества, несущего электрические заряды, а также образование термоэлектрических токов. По-видимому, эти процессы являются причиной возникновения в недрах Земли электрических токов, которые на поверхности и в атмосфере Земли образуют земное магнитное поле. Хотя это поле довольно слабое, оно способно заметно искривить путь электронного пучка, в том числе потоки заряженных частиц космического излучения. Это позволяет использовать Землю во многих экспериментах с космическими лучами как гигантский анализирующий магнит.

Магнитные полюсы находятся внутри Земли, поэтому силовые линии магнитного поля пересекают ее поверхность. Касательные к

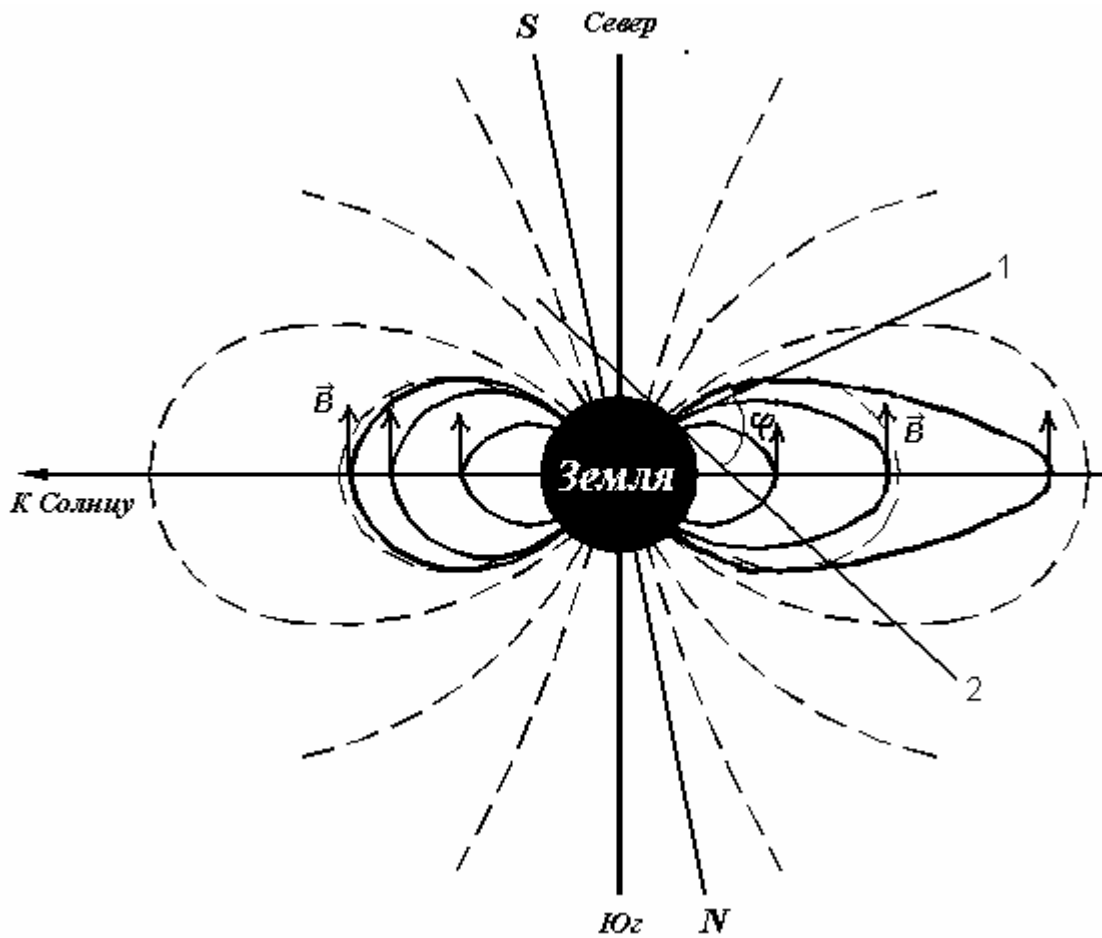


Рис. 16.1

силовым линиям располагаются под некоторым углом к горизонту, который называется *магнитным наклоением*. С приближением к магнитному полюсу угол магнитного наклоения возрастает (вплоть до  $90^\circ$  на магнитном полюсе). От магнитного наклоения следует отличать *магнитное склонение* – угол между направлением касательной к силовой линии магнитного поля и направлением географического меридиана. Каждая точка земной поверхности имеет свое магнитное склонение.

Магнитную индукцию поля Земли  $\vec{B}_z$  можно разложить на вертикальную  $\vec{B}_{\text{верт}}$  и горизонтальную  $\vec{B}_{\text{гор}}$  составляющие, причем  $\vec{B}_z = \vec{B}_{\text{верт}} + \vec{B}_{\text{гор}}$ . Из рис. 16.2 видно, что угол магнитного наклоения

$$\varphi = \text{arctg} \frac{B_{\text{верт}}}{B_{\text{гор}}}. \quad (16.1)$$

Чтобы найти  $\varphi$ , необходимо измерить величины вертикальной  $B_{\text{верт}}$  и горизонтальной  $B_{\text{гор}}$  составляющих магнитной индукции  $\vec{B}_z$ .

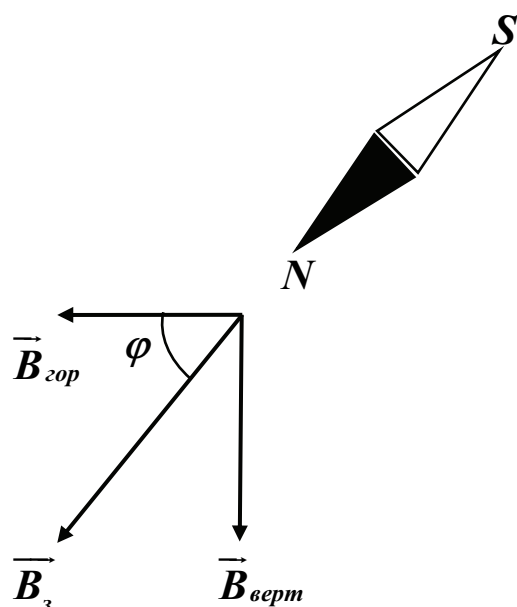


Рис. 16.2

Для измерения этих величин в лабораторной работе используется модификация баллистического метода, в основу которого положено явление электромагнитной индукции. Общий вид лабораторной установки, предназначенной для измерения величин силовых характеристик постоянных магнитных полей, приведен на рис. 16.3.

Главной частью установки является земной индуктор **ЗИ**, состоящий из круговой катушки (1), которая является основной частью индуктора, токосъемных втулок (2), поддерживающих стоек (3) и платформы (4). Катушка с помощью втулок и поддерживающих стоек устанавливается на платформе и может свободно вращаться. Для удобства выполнения измерений ось вращения проходит через центр масс катушки вдоль ее диаметра. На катушку намотано  $N$  витков провода, концы обмотки соединены с клеммами (5), к которым подключен гальванометр **Г**. При повороте катушки вокруг оси вращения за промежуток времени  $\Delta t$  изменяется магнитный поток  $\Phi_m$  поля Земли, пронизывающий каждый виток катушки, следовательно, изменяется и потокосцепление катушки  $\Psi_m = N\Phi_m$  на величину  $\Delta\Psi_m = \Psi_k - \Psi_0$ , где  $\Psi_0$  – начальное значение потокосцепления, а  $\Psi_k$  – конечное. В общем случае, согласно закону электромагнитной индукции Фарадея, изменение потокосцепления, происходящее в течение времени  $dt$ , ведет к появлению в катушке ЭДС индукции

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Psi_m}{dt}.$$

Под действием  $\mathcal{E}_i$  в цепи протекает индукционный ток



$$I_i = -\frac{d\Psi_m}{Rdt}.$$

Поскольку сила тока

$$I_i = \frac{dq}{dt},$$

то

$$\frac{dq}{dt} = -\frac{d\Psi_m}{Rdt}.$$

Величина заряда  $dq$ , который переносится в катушке за бесконечно малый промежуток времени  $dt$ , будет

$$dq = -\frac{1}{R}d\Psi_m.$$

Интегрирование последнего выражения по времени, в течение которого наблюдается изменение потокосцепления от  $\Psi_0$  до  $\Psi_k$ , дает для величины заряда, который пройдет в контуре, выражение

$$q = -\int dq = -\frac{1}{R} \int_{\Psi_0}^{\Psi_k} d\Psi_m = \frac{1}{R}(\Psi_0 - \Psi_k) = \frac{1}{R} \Delta\Psi_m. \quad (16.2)$$

Для земного индуктора изменение потокосцепления  $\Delta\Psi_m$  связано с изменением ориентации плоскости катушки относительно силовых линий магнитного поля, т.е. меняется только угол между внешней нормалью к плоскости индуктора и магнитной индукцией. Следовательно, если катушку индуктора повернуть на  $180^\circ$ , то знак потокосцепления изменится на противоположный, а величина потокосцепления не изменится. Тогда

$$\Delta\Psi_m = 2\Psi = 2B_nSN, \quad (16.3)$$

где  $B_n$  – проекция  $\vec{B}_{верт}$  на направление нормали к плоскости катушки в исходном состоянии;  $S$  – площадь витка;  $N$  – число витков катушки земного индуктора (рис. 16.4).

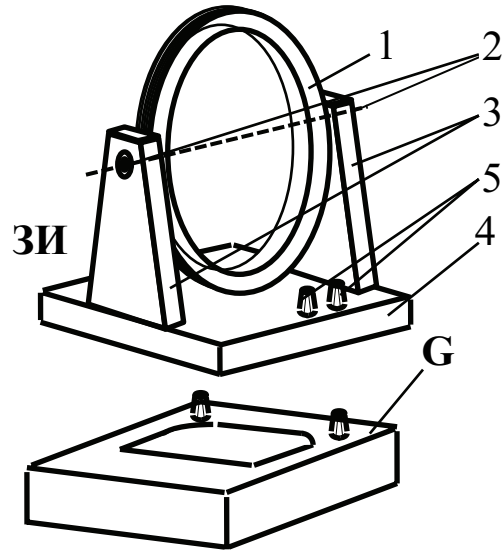


Рис. 16.3

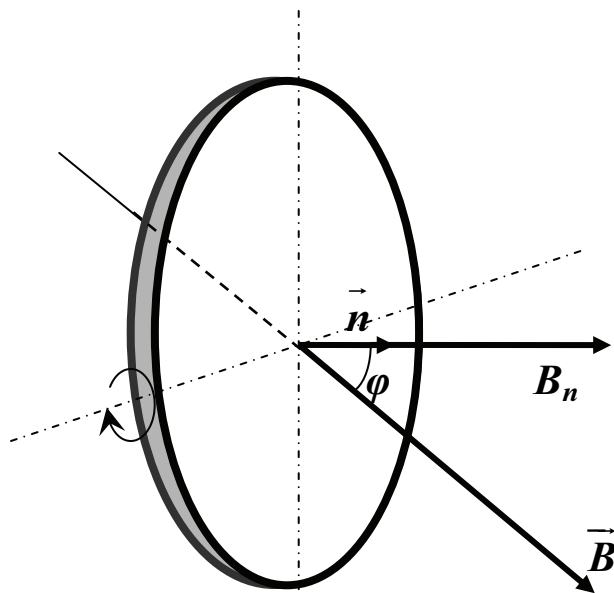


Рис. 16.4

Если начальное положение катушки таково, что вектор нормали  $\vec{n}$  направлен вертикально, то роль  $B_n$  будет играть вертикальная проекция магнитной индукции поля Земли  $B_{верт}$ , если  $\vec{n}$  направлен горизонтально, то —  $B_{гор}$ .

Сопоставив соотношения (16.2) и (16.3), приходим к выводу, что количество заряда, протекающего в катушке при ее повороте на угол  $180^\circ$ ,

зависит от величины составляющей магнитной индукции поля, которая перпендикулярна к плоскости начального положения катушки. Поэтому, измерив заряд, индуцированный в измерительной цепи при повороте катушки индуктора на  $180^\circ$ , можно определить величину этой составляющей:

$$B_{гор} = \frac{\Delta\Psi_m}{2SN} = \frac{Rq}{2SN}. \quad (16.4)$$

Изменяя направление оси вращения катушки, можно определить величины составляющих магнитной индукции поля, которые совпадают с соответствующими направлениями.

Величину заряда  $q$ , протекающего в катушке в результате явления электромагнитной индукции, находят с помощью баллистического гальванометра. Баллистический гальванометр отличается от обычного тем, что он обладает большим моментом инерции подвижной системы, следовательно, большим периодом колебаний. Если время протекания тока через рамку гальванометра мало по сравнению с периодом колебаний рамки, величина первого отброса «зайчика» гальванометра  $n$  пропорциональна заряду, прошедшему через гальванометр:

$$q = Cn, \quad (16.5)$$

где  $C$  — постоянная гальванометра. Подставив соотношение (16.5) в (16.4), получим

$$B_{гор} = \frac{CR}{2NS} n = \beta n, \quad (16.6)$$

где  $\beta$  – постоянная измерительной цепи установки (указана на рабочем месте). Очевидно, что аналогичная зависимость имеет место и для  $B_{верт}$ :

$$B_{верт} = \beta n. \quad (16.7)$$

### Порядок выполнения работы

1. Включить в сеть баллистический гальванометр, предварительно подсоединив его к клеммам земного индуктора.
2. Провести измерение величины вертикальной составляющей  $B_{верт}$  магнитной индукции поля Земли. Для этого:
  - а) расположить индуктор таким образом, чтобы ось вращения катушки была расположена горизонтально, вдоль географического меридиана (направление меридиана указано на рабочем месте), при этом плоскость катушки должна быть также горизонтальной;
  - б) быстро повернуть катушку относительно оси на угол  $180^\circ$ , определить абсолютное значение первого отброса «зайчика» гальванометра  $n_1$ ;
  - в) быстро вернуть катушку в исходное положение и определить абсолютное значение второго отброса «зайчика» гальванометра  $n_2$ ; опыт проделать пять раз и найти среднее значение  $\langle n_{верт} \rangle$  (по данным 10 измерений  $n_i$ ), результаты измерений занести в табл. 16.1.
3. Провести измерение величины горизонтальной составляющей  $B_{гор}$  магнитной индукции поля Земли. Для этого расположить ось вращения катушки вертикально и перпендикулярно плоскости географического меридиана. Провести измерения, аналогичные п. 2 (б, в), и найти среднее значение  $\langle n_{гор} \rangle$ .
4. По формулам (16.6) и (16.7) вычислить величины  $B_{верт}$  и  $B_{гор}$ .
5. Рассчитать значение угла магнитного наклона  $\varphi$  по формуле (16.1).

Таблица 16.1

Номер измерения	Измерение $B_{\text{верт}}$			Измерение $B_{\text{гор}}$			$\varphi$
	$n_{i \text{ верт}}$ , дел.	$\langle n_{\text{верт}} \rangle$ , дел.	$B_{\text{верт}}$ , Тл	$n_{i \text{ гор}}$ , дел.	$\langle n_{\text{гор}} \rangle$ , дел.	$B_{\text{гор}}$ , Тл	
1							
2							
...							
10							

### Контрольные вопросы

#### Вариант 1

1. Сформулируйте и запишите закон электромагнитной индукции Фарадея. Сформулируйте правило Ленца.
2. В чем состоит физическая суть метода определения угла магнитного наклона с помощью земного индуктора?
3. Какую физическую величину можно измерить с помощью гальванометра? Почему в работе используется именно баллистический гальванометр?
4. *Задача.* Круговой контур радиусом  $r = 2$  см располагается в однородном магнитном поле, магнитная индукция которого  $B = 0,2$  Тл. Плоскость контура перпендикулярна силовым линиям магнитного поля, сопротивление контура  $R = 1$  Ом. Какой заряд протечет через контур при повороте его относительно оси на  $90^\circ$ ?  
*Ответ:*  $q = 2,5 \cdot 10^{-4}$  Кл.

#### Вариант 2

1. Нарисуйте силовые линии магнитного поля Земли. Покажите на рисунке расположение географических и магнитных полюсов Земли, угол магнитного наклона.
2. Дайте определение: а) магнитного потока; б) потокосцепления. Назовите единицы измерения этих величин и запишите форму-

лы для их вычисления. Чем обусловлено изменение потокосцепления при повороте земного индуктора?

3. В чем заключается явление самоиндукции? Запишите формулу для ЭДС самоиндукции.
4. *Задача.* Через катушку, индуктивность которой  $L = 0,021$  Гн, протекает ток, изменяющийся со временем по закону  $I(t) = I_0 \sin \omega t$ , где  $I_0 = 5$  А,  $\omega = 3,14$  рад/с. Найти зависимость от времени ЭДС самоиндукции, возникающей в катушке.

*Ответ:*  $\mathcal{E} = 32,97 \cos 314t$ .

### *Вариант 3*

1. В чем заключается явление электромагнитной индукции и как оно используется в данной работе?
2. Выведите выражение для величины заряда, который протечет в проводящем контуре при повороте его в магнитном поле.
3. Назовите вихри магнитного поля. Объясните, что называется линиями магнитной индукции и как определяется их направление.
4. *Задача.* Медный обруч массой  $m = 5$  кг расположен в плоскости магнитного меридиана. Какой заряд протечет в обруче при его повороте вокруг вертикальной оси на  $90^\circ$ ? Величина горизонтальной составляющей магнитного поля Земли  $B_{гор} = 2 \cdot 10^{-4}$  Тл, плотность меди  $\rho = 8900$  кг/м<sup>3</sup>.

*Ответ:*  $q = 5,5 \cdot 10^{-2}$  Кл.

## Лабораторная работа № 2-17

### ИЗМЕРЕНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПОМОЩЬЮ ПОЯСА РОГОВСКОГО

*Цель работы* – изучение явления электромагнитной индукции и измерение силы переменного тока с помощью пояса Роговского.

*Приборы и принадлежности:* пояс Роговского **ПР**; прямоугольная рамка **Р**, образованная витками провода; лабораторный автотрансформатор **ЛАТР**; реостат **Р**; амперметр **А**; милливольтметр переменного тока **mV**.

## Описание установки и вывод рабочей формулы

В ряде случаев измерение переменных токов обычными методами оказывается невозможным или затруднительным: например, при измерениях переменных токов в высоковольтных линиях, для измерения импульсных токов заряженных частиц в плазме и ускорителях. Поскольку в таких случаях включение амперметра невозможно, производится бесконтактное измерение величины переменного тока с помощью пояса Роговского. Бесконтактный метод основан на регистрации переменных магнитных полей, возбуждаемых переменным током.

Схема лабораторной установки, предназначенной для бесконтактного измерения величины переменного тока, приведена на рис. 17.1. Она содержит рамку **Р**, состоящую из  $N$  витков медной проволоки. По рамке пропускается переменный электрический

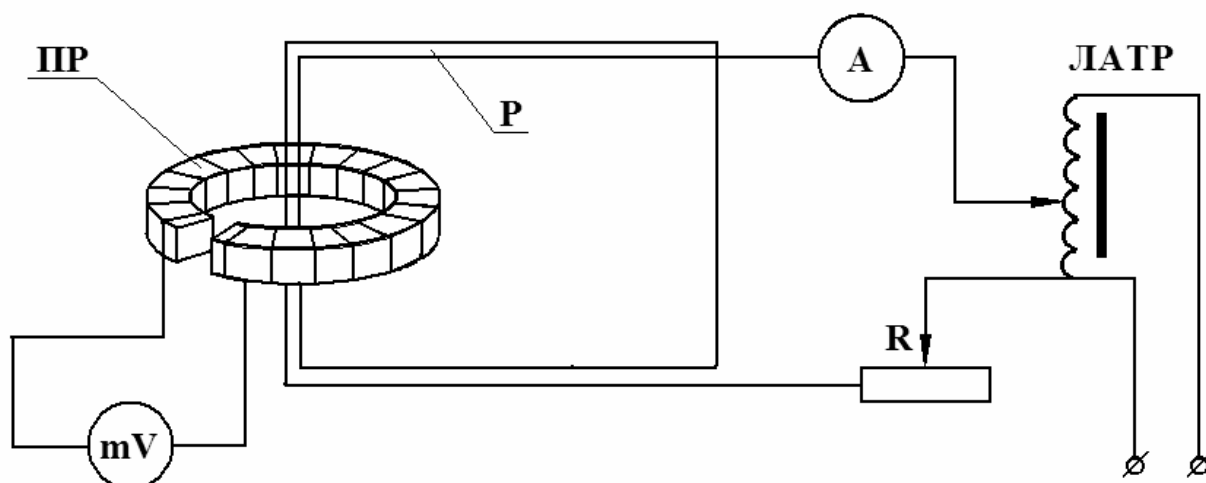


Рис. 17.1

ток, величина которого может регулироваться ЛАТРом (грубо) и реостатом **Р** (точно). Одну из сторон рамки охватывает тороидальная катушка квадратного сечения с числом витков  $N_1$  – пояс Роговского (**ПР**).

Рассмотрим принцип действия **ПР**. При протекании переменного электрического тока по рамке вокруг нее возникает переменное магнитное поле. Плоскость одного витка **ПР** будет пересекать магнитный поток

$$\Phi_m = \langle B \rangle S \cos \varphi, \quad (17.1)$$

где  $\langle B \rangle$  – величина магнитной индукции поля на поверхности  $S$ , ограниченной витком;  $\varphi$  – угол между направлением магнитной индукции  $\vec{B}$  и внешней нормалью к поверхности  $S$ .

Виток **ПР** имеет вид квадратного контура со стороной  $a$  (рис.17.2). Поскольку размеры рамки существенно больше разме-

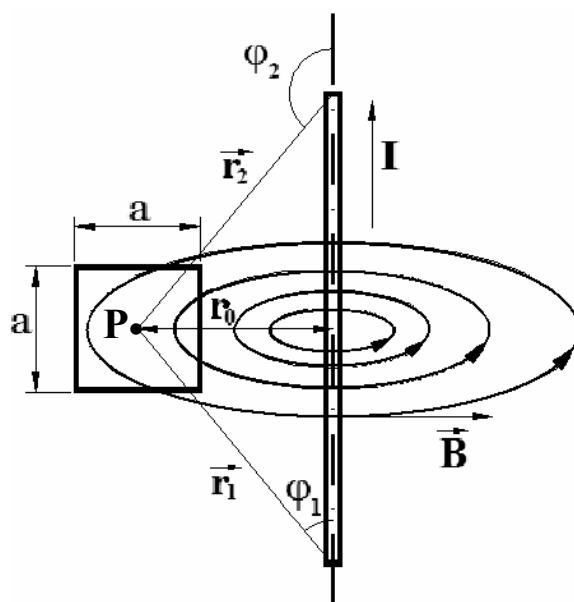


Рис. 17.2

ров **ПР** и  $a < r_0$ , где  $r_0$  – кратчайшее расстояние от проводника с током до средней линии тороида (пояса Роговского), величину магнитной индукции в точке **Р**, создаваемой одним витком рамки, можно определить по формуле для магнитной индукции прямолинейного отрезка проводника с током:

$$\langle B \rangle = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_0} (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2),$$

где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – углы между радиусами-векторами  $\vec{r}_1$  и  $\vec{r}_2$ , проведенными из начала и конца проводника в точку наблюдения **Р**, и направлением тока в проводнике.

Соответственно, величина магнитной индукции в точке **Р**, создаваемой  $N$  витками рамки, будет

$$\langle B \rangle = N \frac{\mu_0 I}{4\pi r_0} (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2). \quad (17.2)$$

Расположив виток так, чтобы его плоскость была перпендикулярной к силовым линиям, получим максимальный поток сквозь него (поскольку  $\varphi = 0$ ,  $\cos \varphi = 1$  и  $\Phi_m = \Phi_{m \max}$ ). Потокосцепление ПР, состоящего из  $N_1$  витков, можно записать в виде

$$\Psi_m(t) = N_1 \langle B \rangle S = N_1 N \frac{\mu_0 S}{4\pi r_0} (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2) I_{\max} \cos \omega t, \quad (17.3)$$

где  $I = I_{\max} \cos \omega t$  – мгновенное значение переменного электрического тока в рамке,  $\omega$  – его циклическая частота.

При протекании переменного электрического тока по рамке Р в поясе Роговского, согласно закону электромагнитной индукции, возникает ЭДС индукции

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Psi_m}{dt} = NN_1 \frac{\mu_0 S}{4\pi r_0} (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2) \omega I_{\max} \sin \omega t.$$

Величина  $\mathcal{E}$  пропорциональна мгновенному значению тока  $I$ , текущего по рамке:

$$\mathcal{E} = DI.$$

Отсюда

$$I = \frac{\mathcal{E}}{D}, \quad (17.4)$$

где  $D = \frac{NN_1 \mu_0 S \omega (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2)}{4\pi r_0}$  – постоянная, используемая в работе (значение  $D$  указано на рабочем месте).

Поскольку внутреннее сопротивление милливольтметра  $mV$ , подключенного к клеммам пояса, существенно превосходит омическое и индуктивное сопротивления пояса, милливольтметр регистрирует эффективное значение ЭДС, наводимой в поясе:

$$\mathcal{E}_{\text{эф}} = \frac{\mathcal{E}_{\max}}{\sqrt{2}}.$$

Поэтому, используя показания милливольтметра, по формуле (17.4) можно вычислить  $I$  – суммарный ток, текущий по  $N$  виткам рамки, и определить  $I_{p. \text{теор}}$  – ток, текущий по одному витку рамки:

$$I_{p. \text{теор}} = \frac{I}{N} = \frac{\mathcal{E}}{ND}.$$



В силу пропорциональности мгновенных значений  $\mathcal{E}$  и  $I$  (17.4) справедливо соотношение

$$I_{max} = \frac{\mathcal{E}_{max}}{D}.$$

Поэтому

$$I_{p.теор} = \frac{\mathcal{E}_{max}}{ND} = \frac{\mathcal{E}_{эф} \sqrt{2}}{ND}. \quad (17.5)$$

### Порядок выполнения работы

1. Установить ползунок реостата в среднее положение, а ручку ЛАТ-Ра – в нулевое положение (крайнее против часовой стрелки).
2. Включить питание установки.
3. Отметим, что при протекании по цепи переменного тока амперметром А (рис. 17.1) измеряется эффективное значение силы тока  $I_{эф} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}}$ , поэтому ток, текущий через рамку, будет  $I_{p.эксп} = I_{эф} \sqrt{2}$ . Устанавливая последовательно значения силы тока в рамке  $I_{эф} = 2, 3, 4, 5$  А, измерить величины  $\mathcal{E}_{эф}$  соответствующей ЭДС, генерируемой в поясе Роговского. Рассчитать значения  $I_{p.эксп}$ , результаты измерений и вычислений занести в табл. 17.1.
4. По измеренным значениям  $\mathcal{E}_{эф}$  рассчитать величину тока в рамке  $I_{p.теор}$  по формуле (17.5). Результаты расчетов занести в табл. 17.1.
5. Сравнить значения  $I_{p.эксп}$  с  $I_{p.теор}$ .

Таблица 17.1

Номер опыта	$I_{эф}$ , А	$\mathcal{E}_{эф}$ , В	$I_{p.эксп}$ , А	$I_{p.теор}$ , А
1	2			
2	3			
3	4			
4	5			

## Контрольные вопросы

### Вариант 1

1. Сформулируйте принцип суперпозиции для магнитного поля.
2. Выведите формулу для магнитной индукции поля, созданного отрезком прямолинейного проводника с током.
3. Сформулируйте и запишите закон электромагнитной индукции. Сформулируйте правило, с помощью которого можно определить направление индукционного тока.
4. *Задача.* В однородном магнитном поле с магнитной индукцией  $B = 0,05$  Тл находится плоский контур, площадь которого  $S = 20$  см<sup>2</sup>. Определить магнитный поток, который пронизывает поверхность, ограниченную контуром, если плоскость контура образует угол  $\alpha = 30^\circ$  с линиями магнитной индукции.

*Ответ:*  $\Phi_m = 5 \cdot 10^{-5}$  Вб.

### Вариант 2

1. Сформулируйте и запишите закон Био–Савара–Лапласа.
2. Получите формулу для потокосцепления пояса Роговского, если по проводнику, охваченному поясом, протекает переменный ток.
3. Для каких практических целей может быть использован пояс Роговского?
4. *Задача.* По проводу, согнутому в виде кольца радиусом  $R = 11$  см, течет ток  $I = 14$  А. Найти магнитную индукцию поля  $B$ , созданного этим током в центре кольца.

*Ответ:*  $B = 80$  мкТл.

### Вариант 3

1. В чем состоит явление электромагнитной индукции?
2. Дайте определение магнитного потока и потокосцепления и запишите формулы для их вычисления. В каких единицах измеряются эти величины?
3. Можно ли использовать пояс Роговского для измерения постоянного тока? Ответ поясните.
4. *Задача.* Из проволоки длиной  $l = 1$  м сделана квадратная рамка. По рамке течет ток  $I = 10$  А. Найти магнитную индукцию поля в центре рамки.

*Ответ:*  $B = 112,79$  Тл.

## Лабораторная работа № 2-18

### ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ САМОИНДУКЦИИ

*Цель работы* – исследование процессов возрастания и убывания силы тока в цепи, содержащей индуктивность, определение индуктивности катушки.

*Приборы и принадлежности:* генератор прямоугольных импульсов напряжения; осциллограф;  $RL$ -цепь.

#### Описание лабораторной установки и методики измерений

Известно, что изменение силы тока в цепи, содержащей индуктивность, при подключении либо отключении источника тока происходит не мгновенно. Такое поведение объясняется наличием явления самоиндукции.

Получим выражения для зависимости тока в  $RL$ -цепи от времени при подключении либо отключении источника тока (рис. 18.1). Пусть в начальный момент времени источник тока подключен (ключ  $K$  в положении  $1$ ). В цепи течет постоянный ток

$$I_0 = \frac{\varepsilon}{R}. \quad (18.1)$$

Здесь под  $R$  подразумевается полное сопротивление цепи, при этом ввиду малости сопротивление источника тока не учитываем. Если сила тока в  $RL$ -цепи будет меняться, то закон Ома примет вид

$$I = \frac{\varepsilon + \varepsilon_{si}}{R}, \quad (18.2)$$

где  $\varepsilon_{si}$  – ЭДС самоиндукции, возникающая в соленоиде при изменении тока. Так как  $\varepsilon_{si} = -L \frac{dI}{dt}$ , выражение (18.2) можно переписать так:

$$L \frac{dI}{dt} + RI - \varepsilon = 0. \quad (18.3)$$

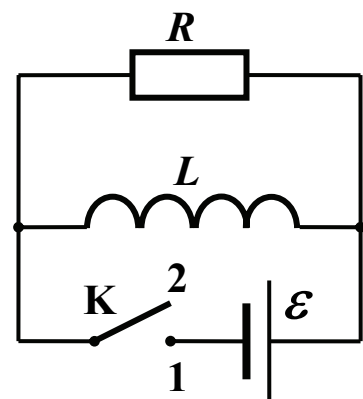


Рис. 18.1

Решением этого дифференциального уравнения (с учетом начального условия  $I(t=0) = I_0$ ) является функция

$$I(t) = I_0 e^{-\frac{R}{L}t} + \frac{\mathcal{E}}{R} \left( 1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right). \quad (18.4)$$

Таким образом, сила тока в  $RL$ -цепи при подключении или

отключении источника меняется не мгновенно, а по экспоненте (рис. 18.2). Величина

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (18.5)$$

имеет размерность времени и характеризует быстроту изменения тока в  $RL$ -цепи. Ее называют постоянной времени, или временем релаксации. Из уравнения (18.4) видно, что время релаксации – это время, в течение которого сила тока меняется в  $e$  раз.

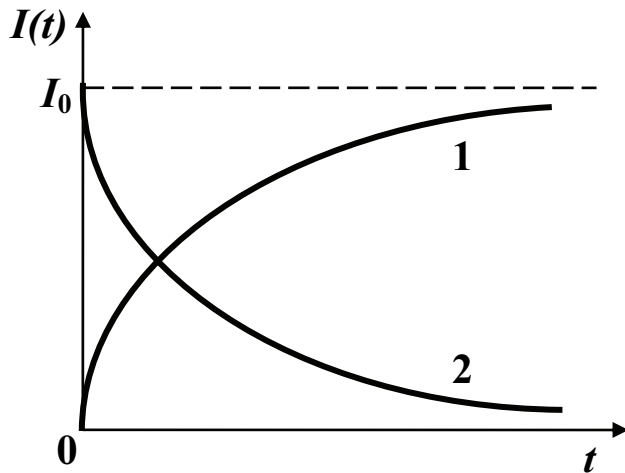


Рис. 18.2

Рассмотрим два случая:

1. Первоначально ключ  $\mathbf{K}$  разомкнут (см. рис. 18.1). Ток в цепи отсутствует, т.е.  $I(t=0) = 0$ . При замыкании ключа  $\mathbf{K}$  сила тока в цепи начнет возрастать, уравнение (18.4) примет вид

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} \left( 1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right). \quad (18.6)$$

График этой функции показан на рис. 18.2 (кривая 1).

2. Первоначально ключ  $\mathbf{K}$  замкнут. По катушке  $L$  (см. рис. 18.1) течет постоянный ток силой  $I(t=0) = I_0$ . В момент размыкания ключа источник тока отключается от  $RL$ -цепи и  $\mathcal{E}(t=0) = 0$ . В этом случае уравнение (18.4) примет вид

$$I(t) = I_0 e^{-\frac{R}{L}t}. \quad (18.7)$$

График этой функции показан на рис. 18.2 (кривая 2).

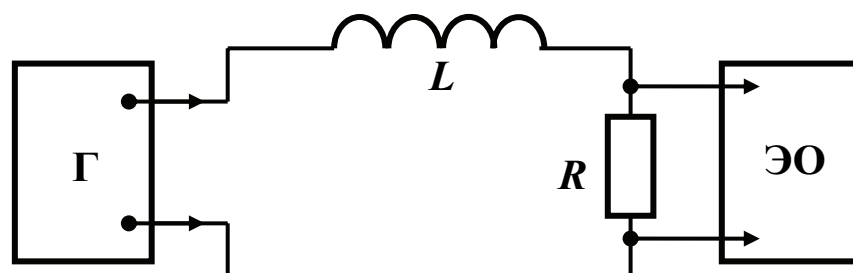


Рис. 18.3

На рис. 18.3 представлена схема установки, используемой в данной работе. С генератора  $\Gamma$  на  $RL$ -цепь подаются прямоугольные импульсы напряжения частотой  $\nu = 1000$  Гц (рис. 18.4, а). Подача прямоугольных импульсов напряжения аналогична коммутации источника тока ключом  $\mathbf{K}$ . Через обмотку соленоида и резистор  $R$  течет ток. Зависимость силы тока от времени исследуется с помощью осциллографа, на вход которого подается сигнал, равный падению напряжения на резисторе  $I(t)R$ , т.е. пропорциональный силе тока (рис. 18.4, б). Измерив по точкам на экране осциллографа зависимость  $I(t)$ , можно определить постоянную времени цепи, индуктивность  $L$ , если известно сопротивление  $R$ , либо полное сопротивление цепи, если известна индуктивность.

Для упрощения процесса измерения зависимости  $I(t)$  в осциллографе используется функция меток времени. Методика подобных измерений с применением меток описана в лабораторной работе № 2-04. Исходя из формул (18.4), (18.5) и (18.6) имеем следующее:

$$\tau = \frac{\Delta t}{\Delta \ln \frac{I_0}{I_0 - I(t)}} \quad (\text{при возрастании силы тока}); \quad (18.8)$$

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{\Delta t}{\Delta \ln \frac{I_0}{I(t)}} \quad (\text{при убывании силы тока}), \quad (18.9)$$

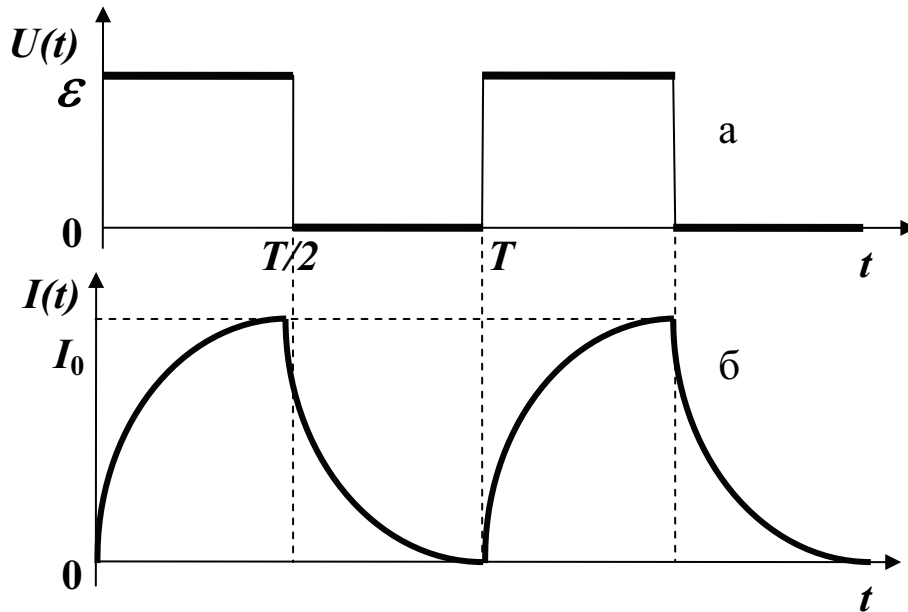


Рис. 18.4

где  $\Delta t$  – интервал времени изменения соответствующего логарифма на величину  $\Delta \ln \dots$ . По полученным данным  $I(t)$  находятся зависимости соответствующих логарифмов от времени. Теоретически зависимости  $\ln \frac{I_0}{I_0 - I(t)} = f_1(t)$  и  $\ln \frac{I_0}{I(t)} = f_2(t)$  должны

быть линейными, однако из-за погрешности измерений возникают отклонения экспериментальных точек от линейной зависимости

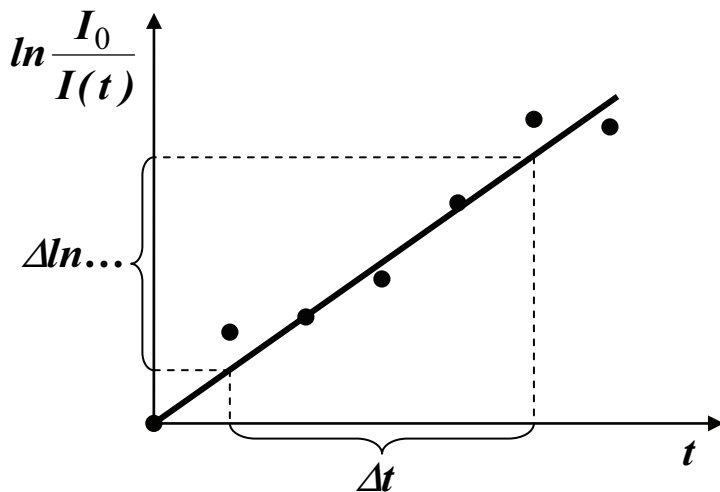


Рис. 18.5

(рис. 18.5). Поэтому экспериментальные точки наносятся на график и графически экстраполируются линейной зависимостью. Далее, пользуясь формулами (18.8) и (18.9), по полученным графикам определяется постоянная времени  $\tau_{\text{эсп}}$ .

## Порядок выполнения работы

*Задание 1. Определение постоянной времени **RL**-цепи и индуктивности катушки по зависимости силы тока от времени при нарастании тока*

1. Проверить правильность подключения генератора и осциллографа к **RL**-цепи и включить их питание. Установить на генераторе частоту импульсов напряжения  $\nu = 1000$  Гц.

2. Добиться на экране осциллографа стабильной картинке, аналогичной рис. 18.4, б. Включить функцию меток времени и установить длительность меток 20 мкс (ручка «Метки» на осциллографе).

3. На осциллограмме кривой увеличения силы тока определить координаты первых 5–10 меток, т.е. значения времени (координата по горизонтальной оси на экране) и силы тока (координата по вертикальной оси). Данные занести в табл. 18.1.

Таблица 18.1

Номер метки $n$	$t = n \cdot 20,$ мкс	$I_n(t),$ дел.	$\frac{I_0}{I_0 - I_n}$	$\ln \frac{I_0}{I_0 - I_n}$	$\tau_{эксп},$ с
1	0				
2	20				
...	...				

4. Для всех измеренных величин тока найти значения отношения  $\frac{I_0}{I_0 - I_n}$  и его логарифма. Результаты расчетов занести в табл. 18.1.

5. По полученным данным построить график зависимости  $\ln \frac{I_0}{I_0 - I(t)} = f_1(t)$ .

6. По формуле (18.8) определить постоянную времени данной **RL**-цепи.

7. Используя полученное значение постоянной времени, по формуле (18.5) рассчитать величину индуктивности  $L$  соленоида ( величина полного сопротивления цепи  $R$  дана на установке).

*Задание 2. Определение постоянной времени  $RL$ -цепи и индуктивности катушки по зависимости силы тока от времени при убывании тока*

1. Проверить правильность подключения генератора и осциллографа к  $RL$ -цепи и включить их питание. Установить на генераторе частоту импульсов напряжения  $\nu = 1000$  Гц.

2. Добиться на экране осциллографа стабильной картинке, аналогичной рис. 18.4, б. Включить функцию меток времени и установить длительность меток 20 мкс (ручка «Метки» на осциллографе).

3. На осциллограмме кривой уменьшения силы тока определить координаты первых 5–10 меток, т.е. значения времени (координата по горизонтальной оси на экране) и силы тока (координата по вертикальной оси). Данные занести в табл. 18.2.

Таблица 18.2

Номер метки $n$	$t = n \cdot 20,$ мкс	$I_n(t),$ дел.	$\frac{I_0}{I_n}$	$\ln \frac{I_0}{I_n}$	$\tau_{эксп},$ с
1	0				
2	20				
...	...				

4. Для всех измеренных величин тока найти значения отношения  $\frac{I_0}{I_n}$  и его логарифма. Результаты расчетов занести в табл. 18.2.

5. По полученным данным построить график зависимости  $\ln \frac{I_0}{I(t)} = f_2(t)$ .

6. По формуле (18.9) определить постоянную времени данной  $RL$ -цепи.



7. Используя полученное значение постоянной времени, по формуле (18.5) рассчитать величину индуктивности  $L$  соленоида (величина полного сопротивления цепи  $R$  дана на установке).

### Контрольные вопросы

#### Вариант 1

1. В чем заключается явление самоиндукции?
2. Что такое индуктивность контура, каков ее физический смысл?
3. Запишите закон Ома для цепи, содержащей индуктивность. Объясните его.
4. *Задача.* Через катушку, индуктивность которой  $L = 0,021$  Гн, течет ток, изменяющийся со временем по закону  $I = I_0 \sin \omega t$  (где  $I_0 = 5$  А и  $T = 0,02$  с). Найти зависимости от времени ЭДС самоиндукции, возникающей в катушке.

*Ответ:*  $\varepsilon_{si} = -33 \cos 100\pi t$ , В.

#### Вариант 2

1. Запишите выражение для ЭДС самоиндукции.
2. Какие параметры определяют индуктивность контура? Запишите выражение для индуктивности соленоида.
3. Запишите зависимости убывания и возрастания тока в  $RL$ -цепи.
4. *Задача.* Катушку с индуктивностью  $L = 300$  мГн и сопротивлением  $R = 140$  Ом подключили к источнику постоянного напряжения. В течение какого времени ток в катушке достигнет половины максимального значения?

*Ответ:*  $\Delta t = 1,49$  с.

#### Вариант 3

1. Чем отличается явление самоиндукции от явления электромагнитной индукции?
2. Как определяется постоянная времени  $RL$ -цепи? Каков ее физический смысл?
3. Приведите примеры использования явления самоиндукции в технике.

4. *Задача.* Все геометрические размеры катушки уменьшили вдвое, а количество витков и силу тока в катушке оставили прежними. Как при этом изменились индуктивность катушки и энергия магнитного поля катушки?

*Ответ:* уменьшились вдвое.

## Лабораторная работа № 2-19

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ СОЛЕНОИДА

*Цель работы* – изучение зависимости индуктивности соленоида от числа витков и геометрических размеров с использованием явления электромагнитной индукции.

*Приборы и принадлежности:* генератор прямоугольных импульсов  $\Gamma$ ; осциллограф ЭО; катушка возбуждения; набор соленоидов  $L_i$  (см. табл. 19.1); конденсаторы  $C_1, C_2, C_3$ .

#### Описание установки и вывод рабочей формулы

Лабораторная установка (схема приведена на рис. 19.1) состоит из катушки возбуждения  $L$ , которая подключена к генератору  $\Gamma$ . Генератор создает прямоугольные импульсы с частотой 100 Гц.

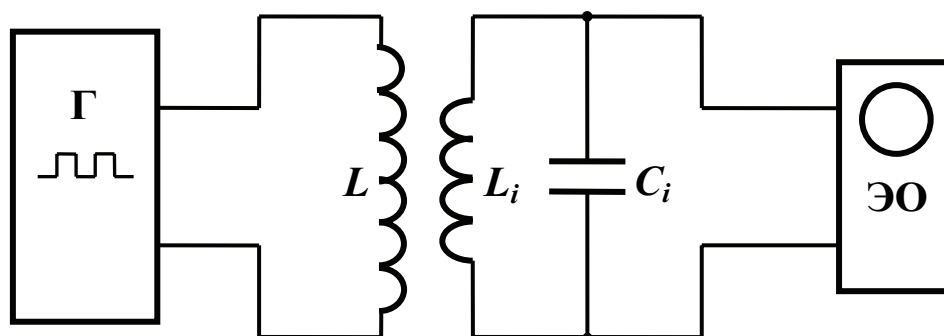


Рис. 19.1

Катушка возбуждения  $L$  индуктивно связана с одним из соленоидов  $L_i$ . При прохождении переменного электрического тока по ка-

тушке возбуждения в соленоиде наводится ЭДС индукции. Это приводит к возникновению электромагнитных колебаний в колебательном контуре, состоящем из конденсатора емкостью  $C_i$  и соленоида индуктивностью  $L_i$ . Колебания напряжения регистрируются осциллографом ЭО, на экране которого можно наблюдать кривую  $U(t)$ .

Переменный электрический ток, протекая по катушке возбуждения, создает внутри нее магнитное поле. При этом, согласно закону электромагнитной индукции Фарадея, в индуктивно связанном с ней соленоиде наводится ЭДС

$$\mathcal{E}_i = -N \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\Psi}{dt},$$

где  $\Phi_m$  – магнитный поток через поверхность, ограниченную одним витком соленоида;  $\Psi_m$  – потокосцепление соленоида;  $N$  – число витков в соленоиде. Потокосцепление соленоида определяется по формуле

$$\Psi = NSB,$$

где  $S = \pi r^2$  – площадь поперечного сечения соленоида. Магнитная индукция поля в соленоиде длиной  $l$  с числом витков  $N$  будет

$B = \mu\mu_0 \frac{N}{l} I$ . Тогда выражение для ЭДС индукции примет вид

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Psi}{dt} = -\mu\mu_0 \frac{N^2}{l} \pi r^2 \frac{dI}{dt} = -L_i \frac{dI}{dt},$$

где

$$L_i = \mu\mu_0 \frac{N^2}{l} \pi r^2 \quad (19.1)$$

– индуктивность соленоида.

ЭДС индукции, возникающая в соленоиде  $L_i$ , приводит к возбуждению электромагнитных колебаний в колебательном контуре, состоящем из конденсатора емкостью  $C_i$  и соленоида индуктивностью  $L_i$ . Ввиду наличия активного сопротивления у проводов и обмотки соленоида колебания, возбуждаемые в контуре, будут затухать. Но так как величина активного сопротивления невелика, а длительность интервала времени, в течение которого рассматривается колебательный процесс, мала ( $\sim$ мкс или мс), можно считать, что коэффициент затухания  $\beta \ll \omega_0$ , где  $\omega_0$  – собственная цикли-

ческая частота колебаний в контуре. Циклическая частота затухающих колебаний  $\omega$  практически совпадает с  $\omega_0$  ( $\omega \approx \omega_0$ ) и период колебаний  $T$  – с периодом  $T_0$  незатухающих колебаний в контуре ( $T \approx T_0$ ), причем согласно формуле Томсона

$$T_0 = 2\pi\sqrt{L_i C_i}. \quad (19.2)$$

Определив экспериментально период данных колебаний, рассчитывают индуктивность соленоида:

$$L_i = \frac{T^2}{4\pi^2 C_i}. \quad (19.3)$$

Затем исследуют зависимость индуктивности соленоида от числа витков и от радиуса соленоида. Параметры соленоидов  $L_i$  приведены в табл. 19.1.

Таблица 19.1

Соленоид	Число витков $N$	Диаметр соленоида $d$ , мм
$L_1$	300	40
$L_2$	300	32
$L_3$	300	26
$L_6$	150	26
$L_7$	75	26

### Порядок выполнения работы

*Задание 1. Изучение зависимости индуктивности от числа витков соленоида*

Для изучения зависимости  $L = f(N)$  использовать соленоиды  $L_3, L_6, L_7$ .

1. Включить питание стенда, осциллографа и генератора.
2. Установить на генераторе частоту  $\nu = 100$  Гц.
3. Подключить  $L_3$  и  $C_1$  в измерительную схему (см. рис. 19.1), для этого вставить катушку возбуждения в соленоид  $L_3$ . Подбирая длительность развертки осциллографа и усиление, получить устойчивое изображение затухающих колебаний на экране осциллографа.
4. Вычислить период затухающих колебаний  $T$  по кривой зависимости  $U(t)$  на экране осциллографа, используя формулу

$$T = \frac{\tau m}{n},$$

где  $\tau$  – длительность развертки (в «мс/дел.» или «мкс/дел.»);  $m$  – число делений (больших клеток) на экране осциллографа, соответствующее  $n$  периодам.

5. Прodelать аналогичные измерения периода затухающих колебаний при подключении к  $L_3$  емкостей  $C_2$  и  $C_3$ . Результаты измерений занести в табл. 19.2.
6. По формуле (19.2) рассчитать для каждой емкости  $C_1, C_2, C_3$  значение  $L_3$ . Вычислить среднее значение  $\langle L_3 \rangle$ , а также значения  $\ln \langle L_3 \rangle$  и  $\ln N_3$ . Результаты занести в табл. 19.2.
7. Прodelать измерения  $T$  и расчеты  $L$  для соленоидов  $L_6$  и  $L_7$  аналогично пп. 3 – 6. Результаты занести в табл. 19.2.

Таблица 19.2

Номер соленоида $i$	$C, \Phi$	$\tau, \text{ мкс/дел.}$	$m$	$n$	$T, \text{ с}$	$L_i, \text{ Гн}$	$\langle L_i \rangle, \text{ Гн}$	$\ln \langle L_i \rangle$	$\ln N_i$ для $i = 3, 6, 7$ ( $\ln r_i$ для $i = 1, 2, 3$ )
3	$C_1$								
6	$C_2$								
7	$C_3$								

8. Построить графики  $\ln L_i$  ( $\ln N_i$ ) для  $i = 3, 6, 7$ . Учитывая, что зависимость  $L(N)$  имеет вид  $L = aN^x$ , где  $a = \text{const}$ , определить из каждого графика показатель степени  $x$  по формуле  $x = \frac{\Delta \ln L_i}{\Delta \ln N_i}$  (аналогично тому, как показано на рис. 19.2, а).
9. На основании полученных данных сделать вывод о зависимости индуктивности  $L$  от числа витков соленоида  $N$ .
10. Рассчитать теоретическое значение  $L_i$  (формула 17.1) и сравнить экспериментально полученный результат с теоретическим.

*Задание 2. Изучение зависимости индуктивности от радиуса соленоида*

Исследование зависимости  $L = f(r)$  проводить на соленоидах  $L_1, L_2, L_3$ .

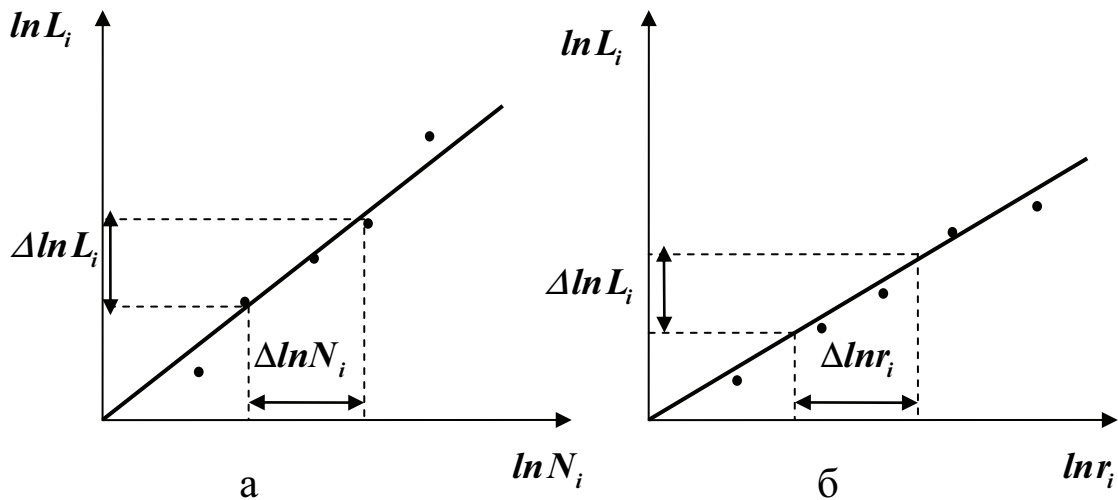


Рис. 19.2

1. Измерения  $L_1$  и  $L_2$  произвести аналогично пп. 3 – 6 задания 1. Значения для  $L_3$  взять из табл. 19.2.
2. Все данные занести в табл. 19.2, в которой: а) в первой графе изменить номера исследуемых соленоидов на 1, 2, 3; б) в последней графе заменить  $\ln N$  на  $\ln r$ .
3. Построить график  $\ln L_i(\ln r_i)$  для  $i = 1, 2, 3$ . Учитывая, что зависимость  $L(r)$  имеет вид  $L = br^y$ , где  $b = \text{const}$ , определить из каждого графика показатель степени  $y$  по формуле  $y = \frac{\Delta \ln L_i}{\Delta \ln r_i}$  (подобно тому, как это показано на рис. 19.2, б).
4. На основании полученных данных сделать вывод о зависимости индуктивности  $L$  от радиуса соленоида  $r$ .
5. Рассчитать теоретическое значение  $L_i$  (формула 17.1) и сравнить экспериментально полученный результат с теоретическим.

### Контрольные вопросы

#### Вариант 1

1. Что называется индуктивностью соленоида? По какой формуле ее вычисляют?

2. Что называется колебательным контуром и каково его назначение? Опишите колебательный процесс в идеализированном колебательном контуре.
3. Какими параметрами определяется индуктивность соленоида?
4. *Задача.* Найти индуктивность катушки длиной 20 см, имеющей 400 витков, внутрь которой введен железный сердечник (магнитная проницаемость железа равна 400). Площадь поперечного сечения катушки  $9 \text{ см}^2$ .  
*Ответ:*  $L = 0,36 \text{ Гн}$ .

### *Вариант 2*

1. Что называется магнитным потоком? Запишите формулу для вычисления магнитного потока. В каких единицах измеряется магнитный поток?
2. Как можно возбудить незатухающие колебания в идеализированном колебательном контуре? Запишите формулы для определения периода и частоты такого контура.
3. В чем состоит явление самоиндукции? Как связаны ЭДС самоиндукции и индуктивность соленоида?
4. *Задача.* Соленоид длиной 20 см и диаметром 3 см имеет 400 витков. По соленоиду течет ток  $I = 2 \text{ А}$ . Найти: 1) индуктивность соленоида; 2) потокосцепление соленоида.  
*Ответ:* 1)  $L = 7,2 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}$ ; 2)  $\Psi = 0,4 \text{ Вб}$ .

### *Вариант 3*

1. Чем создается магнитное поле в соленоиде? Охарактеризуйте такое поле. Запишите формулу для вычисления магнитной индукции поля в соленоиде бесконечной длины.
2. Опишите метод определения индуктивности соленоида, используемый в лабораторной работе.
3. Сформулируйте и запишите теорему о циркуляции вектора магнитной индукции.
4. *Задача.* Сколько витков имеет соленоид индуктивностью  $L = 0,001 \text{ Гн}$ , если при силе тока  $I = 1 \text{ А}$  потокосцепление соленоида  $\Psi_m = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Вб}$ ?  
*Ответ:*  $n = 500$ .

## Лабораторная работа № 2-20

### ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

*Цель работы* – определение основных характеристик ферромагнитных материалов (коэрцитивной силы, остаточной намагниченности, зависимости магнитной проницаемости от внешнего магнитного поля) по петле магнитного гистерезиса.

*Приборы и принадлежности:* электронный осциллограф (ЭО); регулируемый источник переменного напряжения (генератор); набор трансформаторов с различными ферромагнитными сердечниками; интегрирующая *RC*-цепь; сопротивление.

#### Теоретическое введение

Все вещества в природе проявляют магнитные свойства, т. е. являются магнетиками. Разнообразие типов магнетиков обусловлено различием магнитных свойств микрочастиц, образующих вещество, а также характером взаимодействия между ними. Известно, что магнитная индукция  $\vec{B}$ , намагниченность  $\vec{J}$  и напряженность магнитного поля  $\vec{H}$  связаны соотношениями

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{J}) = \mu\mu_0\vec{H}, \quad \vec{J} = (\mu - 1)\vec{H} = \chi\vec{H}, \quad (20.1)$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость;  $\chi$  – магнитная восприимчивость магнетика. Зная одну из этих характеристик магнитного поля в среде, можно найти другие в зависимости от поставленной задачи.

Все магнетики условно делят на два класса:

I. Слабые магнетики, в которых при отсутствии внешнего магнитного поля не существует магнитного упорядочения магнитных моментов атомных носителей магнетизма. К ним относятся:

1. Диамагнетики (инертные газы,  $N_2$ ,  $H_2$ ,  $H_2O$ ,  $NaCl$ ,  $Cu$ ,  $Au$ ,  $Ag$  и др.) – магнетики, для которых при отсутствии внешнего магнитного поля ( $\vec{B}_{внешн} = 0$ ) магнитный момент атомов  $\vec{p}_m$ , значит, и намагниченность  $\vec{J}$  равны нулю; при  $\vec{B}_{внешн} \neq 0$  у диамагнетика  $\vec{J}$  направ-



лена навстречу  $\vec{B}_{внешн}$  (магнитная проницаемость диамагнетика  $\mu < 1, \mu \approx 1$ ).

2. Парамагнетики (Al, Li, Na, K, газообразный  $O_2$  и др.) – магнетики, для которых при  $\vec{B}_{внешн} = 0 \vec{p}_m \neq 0$ , но магнитные моменты атомов ориентированы хаотически и поэтому  $\vec{J} = 0$ ; при  $\vec{B}_{внешн} \neq 0$  у парамагнетика  $\vec{J}$  сонаправлена с  $\vec{B}_{внешн}$  (магнитная проницаемость парамагнетика  $\mu > 1, \mu \approx 1$ ).

II. Сильные магнетики, в которых ниже определенной температуры магнитные моменты атомных носителей магнетизма упорядочены каким-либо образом. К ним относятся:

1. Ферромагнетики (Fe, Co, Ni, некоторые редкоземельные металлы и др.) – магнетики (как правило, в твёрдом кристаллическом состоянии), в которых ниже температуры Кюри магнитные моменты атомов (ионов, электронов) будут параллельны друг другу. Особенности ферромагнетиков являются способность намагничиваться даже в слабых полях (т. к.  $\mu \gg 1$ ), нелинейная зависимость  $\vec{B}$  от  $\vec{H}$  ( $\mu$  зависит от  $\vec{H}$  и может достигать значений  $10^6$ ) и заметно выраженный магнитный гистерезис — отставание изменения намагниченности  $\vec{J}$  и магнитной индукции  $\vec{B}$  от изменения  $\vec{H}$  при циклическом перемагничивании ферромагнетика (рис. 20.1). Если учитывать соотношения (20.1) и то, что для ферромагнетика  $\mu \gg 1$ , тогда

$$\vec{J} \approx \mu \vec{H} \quad \text{и} \quad \vec{B} \approx \mu_0 \vec{J}.$$

Поэтому вместо зависимости намагниченности магнетика  $\vec{J}$  от напряженности магнитного поля  $\vec{H}$  можно изучать зависимость магнитной индукции  $\vec{B}$  поля внутри магнетика от  $\vec{H}$ .

2. Антиферромагнетики (твёрдый  $O_2$ , Cr, ряд редкоземельных металлов и др.) – магнетики, для которых ниже температуры Нелля при  $\vec{B}_{внешн} = 0 \vec{p}_m \neq 0$ , магнитные моменты соседних атомов антипараллельны, равны по величине и поэтому  $\vec{J} \approx 0$ ; при  $\vec{B}_{внешн} \neq 0$  у антиферромагнетика  $\vec{J}$  сонаправлена с  $\vec{B}_{внешн}$  (магнитная проницаемость антиферромагнетика  $\mu > 1, \mu \approx 1$ ). Выше

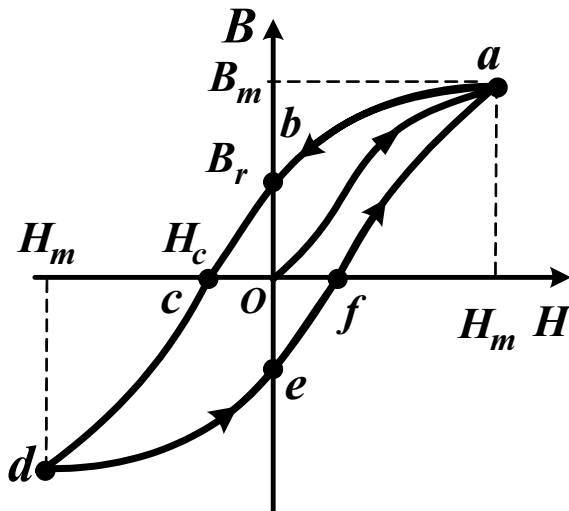


Рис. 20.1

температуры Нееля антиферромагнетик становится парамагнетиком.

3. Ферримагнетики (ферриты, например  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ , гексагональные двойные фториды, например  $\text{RbNiF}_3$ ) – магнетики (в основном, ионные кристаллы), в которых ниже температуры Кюри магнитные моменты атомов образуют две или

большее число подсистем – магнитных подрешёток. Каждая из подрешёток содержит ионы одного сорта с одинаково ориентированными магнитными моментами, т. е.  $\vec{p}_m \neq 0$  и  $\vec{J}_{\text{подреш}} \neq 0$ . При этом  $\vec{J}_{\text{подреш}}$  разных подрешёток направлены навстречу друг другу или (в более общем случае) образуют сложную пространственную конфигурацию. Поэтому при  $\vec{B}_{\text{внешн}} = 0$  возможно состояние, в котором магнитный момент ферримагнетика отличен от нуля. Магнитная проницаемость ферримагнетиков  $\mu \gg 1$ . Эти магнетики обладают свойствами, весьма похожими на свойства обычных ферромагнитных металлов и сплавов, лишь с той разницей, что практически все эти вещества являются неметаллическими (полупроводники). Выше температуры Кюри ферримагнетик становится парамагнетиком.

Рассмотрим теперь поведение ферромагнетика в магнитном поле. В отсутствие магнитного поля ферромагнитный образец разбит на домены – области самопроизвольной однородной намагниченности с определенным направлением  $\vec{J}_{\text{домен}}$  (линейные размеры домена для большинства ферромагнетиков  $10^{-3} \dots 10^{-2}$  см). При этом векторы магнитных моментов отдельных доменов могут быть ориентированы в пространстве таким образом, что результирующий магнитный момент всего магнетика равен нулю.

В магнитном поле в ферромагнетиках происходит изменение объема доменов с различной ориентацией  $\vec{J}_{\text{домен}}$  за счет смещения

границ доменов, а также вращения векторов  $\vec{J}_{\text{домен}}$  доменов. При этом магнитная индукция возрастает согласно кривой *Oa* на рис. 20.1, которая носит название *кривой первоначального намагничивания*. Выше некоторого значения напряженности магнитного поля  $H_m$  магнитная индукция поля  $B$  внутри ферромагнетика не изменяется – достигается магнитное насыщение образца (при этом ферромагнетик состоит из одного домена, в котором магнитная индукция насыщения  $\vec{B}_m$  направлена по полю).

С уменьшением  $H$  до нуля магнитная индукция  $B$  уменьшается до некоторой величины  $B_r$ , называемой *остаточной индукцией*. Для того чтобы размагнитить ферромагнетик, первоначально намагниченный до насыщения, необходимо приложить магнитное поле, величина напряженности которого  $H_c$  называется *коэрцитивной силой*.

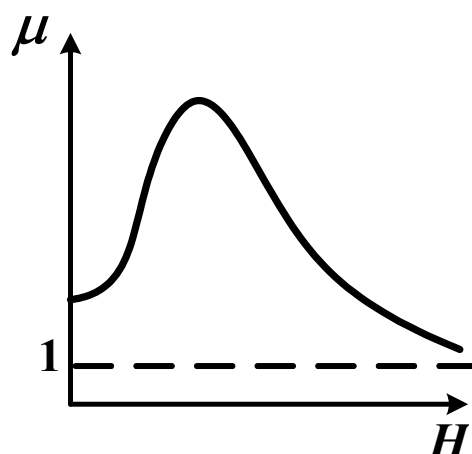


Рис. 20.2

При дальнейшем увеличении магнитного поля обратного направления ферромагнетик вновь намагничивается вдоль поля до насыщения (точка *d*). Перемагничивание образца (из точки *d* в точку *a*) происходит вдоль кривой *defa*. Таким образом, при циклическом изменении магнитного поля кривая, характеризующая изменение магнитной индукции внутри образца, образует *петлю магнитного гистерезиса* (петля *abcdefa*).

Как было отмечено, магнитная проницаемость  $\mu$  ферромагнетика зависит также от напряженности  $H$  внешнего магнитного поля (рис. 20.2). Чтобы получить эту зависимость, пользуются кривой первоначального намагничивания *Oa* (см. рис. 20.1), подставляя координаты точек этой кривой в формулу

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}. \quad (20.2)$$

При неограниченном росте  $H$  значение  $\mu$  стремится к единице (см. рис. 20.2).

Схема установки для получения на экране осциллографа петли гистерезиса представлена на рис. 20.3. Для исследования магнитных свойств ферромагнетика используется трансформатор (ТР) с ферромагнитным сердечником. Первичная обмотка I трансформатора, которая имеет число витков  $N_1$ , питается от источника переменного тока. Эта обмотка служит для создания переменного магнитного поля, намагничивающего сердечник трансформатора.

Связь напряженности магнитного поля  $H$  с падением напряжения  $U_x$  на резисторе сопротивлением  $r_0$  в цепи первичной обмотки может быть получена из закона полного тока (теоремы о циркуляции напряженности магнитного поля  $\vec{H}$ ) и имеет вид

$$H = \frac{N_1}{l} I_1 = \frac{N_1}{l} \frac{U_x}{r_0},$$

откуда

$$U_x = \frac{r_0 l}{N_1} H, \quad (20.3)$$

где  $l$  – длина катушки первичной обмотки трансформатора;  $N_1$  – число ее витков.

Разность потенциалов на резисторе сопротивлением  $r_0$  подается на горизонтально отклоняющие пластины осциллографа ЭО (на вход X). Поэтому согласно (20.3) горизонтальное отклонение луча

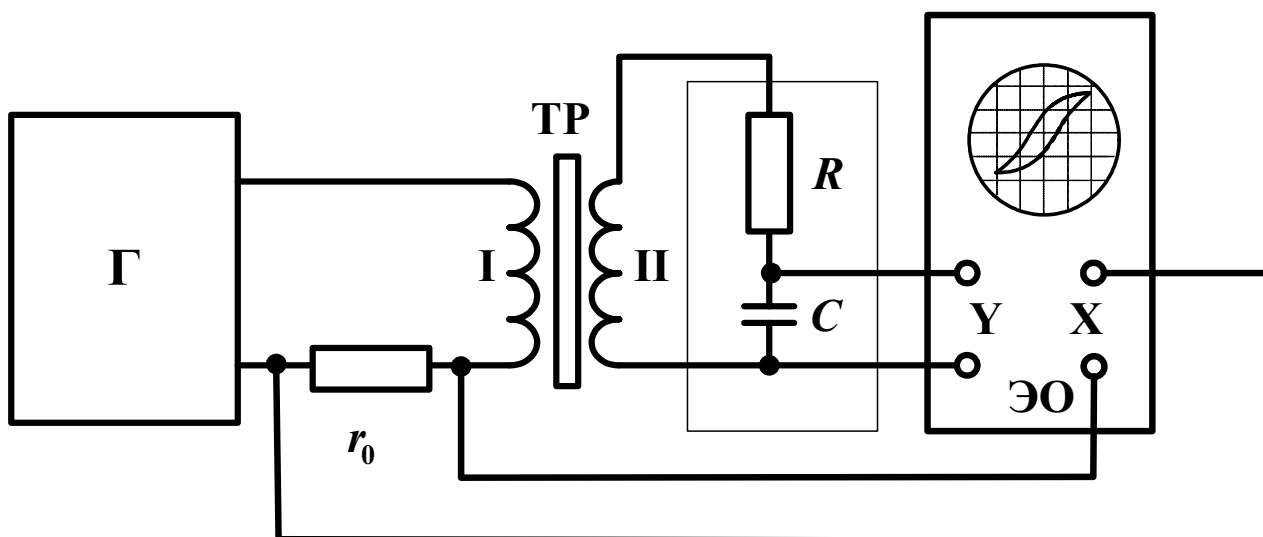


Рис. 20.3

на экране осциллографа пропорционально напряженности магнитного поля  $H$ .

Для измерения магнитной индукции  $B$  в ферромагнитном сердечнике используется вторичная обмотка  $\Pi$  трансформатора. Возникающая в ней ЭДС индукции может быть найдена согласно закону Фарадея:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\partial \Psi}{\partial t} = -N_2 S \frac{\partial B}{\partial t}, \quad (20.4)$$

где  $\Psi = N_2 \Phi = N_2 B S$  – потокосцепление вторичной обмотки;  $\Phi$  – магнитный поток через один виток вторичной обмотки;  $N_2$  и  $S$  – число витков вторичной обмотки и площадь поперечного сечения сердечника трансформатора соответственно.

Напряжение, пропорциональное  $B$ , подается на вертикально отклоняющие пластины осциллографа (вход  $Y$ ). Для этого во вторичную цепь трансформатора включена интегрирующая  $RC$ -цепь.

Ток во вторичной цепи трансформатора

$$I_2 = \mathcal{E}_i / \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2}.$$

Параметры интегрирующей  $RC$ -цепи подбираются так, чтобы выполнялись соотношения  $R \gg \frac{1}{\omega C}$ ,  $R \gg \omega L$ , тогда  $I_2 = \mathcal{E}_i / R$ ,

а напряжение на конденсаторе  $U_C = q/C$ , где  $q = \int_0^t I_2 dt$  — заряд

конденсатора. Напряжение конденсатора  $U_C$  подается непосредственно на вход  $Y$  осциллографа. С учетом (20.4) получим

$$U_y = U_C = \frac{q}{C} = \frac{1}{RC} \int_0^t \mathcal{E}_i dt = -\frac{N_2 S}{RC} B. \quad (20.5)$$

Таким образом, на входы ЭО с горизонтальным и вертикальным отклонением луча подаются сигналы, пропорциональные соответственно напряженности внешнего магнитного поля  $H$  и магнитной индукции  $B$  магнитного поля в сердечнике трансформатора. За один период изменения тока луч на экране ЭО воспроизводит в некотором масштабе петлю гистерезиса.

## Порядок выполнения работы

*Задание 1. Построение кривой первоначального намагничивания*

1. Собрать схему (см. рис. 20.3) с одним из трех трансформаторов, указанным преподавателем, и включить осциллограф (схема подключения указана на рабочем месте).
2. Убрать развертку луча и получить на экране ЭО светящуюся точку, поместить ее с помощью соответствующих ручек регулировки ЭО в центр экрана. Следить в ходе выполнения работы за тем, чтобы светящаяся точка при отсутствии развертки луча находилась в центре экрана ЭО.
3. Включить генератор и установить для сигнала частоту, величина которой указана на рабочем месте.
4. Подать напряжение на первичную обмотку трансформатора. С помощью соответствующих ручек регулировки напряжения на панели генератора и чувствительности осциллографа добиться на экране максимального размера петли гистерезиса.
5. Найти цену деления шкалы ЭО для осей ***V*** и ***H*** по формулам

$$k_H = \frac{N_1 a_x}{l r_0}, \quad k_V = \frac{RC a_y}{N_2 S}, \quad (20.6)$$

где  $a_x$  и  $a_y$  — коэффициенты усиления по осям ***X*** и ***Y*** (определяются на рабочем месте по соответствующей ручке «Усиление» ЭО, единица измерения — В/дел.). Если ферромагнитный сердечник представляет собой замкнутое кольцо (тор), то тогда  $l_{тор} = \pi D$ , где  $D$  — диаметр средней линии тора. Значения  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $r_0$ ,  $R$ ,  $C$ ,  $S$ ,  $l$  (либо  $D$ ) указаны на рабочем месте. Результаты занести в табл. 20.1.

Таблица 20.1

$N_1$	$l$ , м	$r_0$ , Ом	$a_x$ , В дел.	$k_H$ , А/м дел.	$N_2$	$S$ , м <sup>2</sup>	$R$ , Ом	$C$ Ф	$a_y$ , В дел.	$k_V$ , Тл дел.

6. Уменьшая напряжение на первичной обмотке трансформатора до нуля количеством раз, указанным преподавателем, получить семейство кривых гистерезиса, для каждой из которых измерить

координаты правых вершин петель в делениях  $(x, y)$  (рис. 20.4). Результаты занести в табл. 20.2.

7. Для каждого значения напряжения во вторичной обмотке по полученным  $x$  и  $y$ , учитывая (20.6), вычислить  $B$  и  $H$  по формулам

$$H = k_H x, \quad B = k_B y.$$

Результаты занести в табл. (20.2).

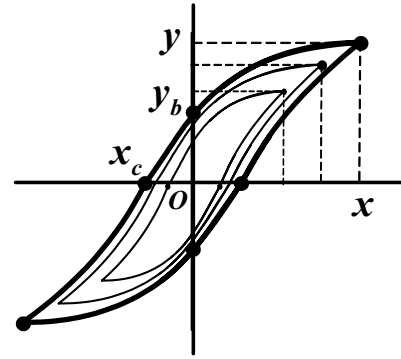


Рис. 20.4

Таблица 20.2

8. По полученным  $B$  и  $H$  построить кривую первоначального намагничивания ( $B = f(H)$ ), а также на этом графике изобразить петлю гистерезиса.

$x$ , дел.	$y$ , дел.	$H$ , А/м	$B$ , Тл	$\mu$

*Задание 2. Изучение зависимости магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля*

1. По рассчитанным  $B$  и  $H$  (задание 1) вычислить магнитную проницаемость, используя формулу

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H} = \frac{k_B}{\mu_0 k_H} \frac{y}{x}.$$

Результаты занести в табл. 20.2.

2. Используя полученные значения  $\mu$ , построить график  $\mu = f(H)$ .

*Задание 3. Определение коэрцитивной силы и остаточной индукции*

- Получить на экране ЭО петлю гистерезиса максимального размера.
- Определить координаты  $x_c$ , а также  $y_b$  (см. рис. 20.4).
- Рассчитать  $B_r$  и  $H_c$  по формулам

$$H_c = k_H x_c, \quad B_r = k_B y_b.$$

- Проанализировать полученные результаты и сделать выводы.

## Контрольные вопросы

### Вариант 1

1. Назовите известные типы магнетиков.
2. Каков физический смысл магнитной проницаемости? Какова ее зависимость от напряженности магнитного поля для диа-, пара- и ферромагнетиков?
3. Что такое остаточная намагниченность ферромагнетика?
4. *Задача.* Определить магнитный момент медного шарика радиусом 2 см, если он находится в магнитном поле  $\vec{B} = 2 \text{ Тл}$  (магнитная восприимчивость меди  $\chi = -1,03 \cdot 10^{-5}$ ).

*Ответ:*  $M = 5,5 \cdot 10^{-4} \text{ А} \cdot \text{м}^2$ .

### Вариант 2

1. Каковы отличительные особенности ферромагнетиков по сравнению с другими магнетиками?
2. Нарисуйте кривые намагничивания для пара-, диа- и ферромагнетиков.
3. Что такое коэрцитивная сила ферромагнетика?
4. *Задача.* Кусок стали поместили в магнитное поле напряженностью  $H = 1400 \text{ А/м}$ . Определить при этом магнитную восприимчивость стали, если магнитная индукция поля внутри образца  $B = 1,24 \text{ Тл}$ .

*Ответ:*  $\chi = 704$ .

### Вариант 3

1. Что представляют собой домены в ферромагнетике и какова природа их происхождения?
2. Каков физический смысл магнитной восприимчивости? Какова ее зависимость от напряженности магнитного поля для диа-, пара- и ферромагнетиков?
3. В чем состоит явление магнитного гистерезиса?
4. *Задача.* На постоянный магнит, имеющий форму цилиндра длиной  $l = 15 \text{ см}$ , намотали равномерно  $N = 1500$  витков тонкого провода. При пропускании по нему тока  $I = 3 \text{ А}$  поле



вне магнита исчезло. Найти коэрцитивную силу  $H_c$  материала магнита.

*Ответ:*  $H_c = 30$  кА/м.

## Лабораторная работа № 2-21

### НАБЛЮДЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛЛОГРАФА

*Цель работы* – ознакомление с устройством и принципом работы электронного осциллографа; измерение с помощью осциллографа параметров синусоидального напряжения; наблюдение биеений и фигур Лиссажу.

*Приборы и принадлежности:* электронный осциллограф (ЭО); вольтметр; трансформатор; два генератора.

#### Теоретическое введение

Электронный осциллограф – прибор, используемый для исследования периодически изменяющихся электрических величин путем наблюдения формы колебаний, определения их амплитуды и частоты.

Основными частями электронного осциллографа являются: электронно-лучевая трубка (ЭЛТ); блоки вертикального (Y) и горизонтального (X) отклонений луча; генератор развертки; блок питания и блок синхронизации.

Электронно-лучевая трубка (рис. 21.1) представляет собой стеклянную колбу, внутри которой помещены электроды для получения электронного пучка и управления его движением. Воздух из колбы откачан. Электроны в ЭЛТ эмитируются катодом **1**, косвенно подогреваемым нитью накаливания **2**. Катод помещен внутри цилиндрического электрода **3**. Изменяя отрицательный потенциал на нем, регулируют количество электронов, достигающих экрана **8**, т.е. регулируют яркость изображения. Первый анод **4** служит для фокусировки, а второй анод **5** – для ускорения электронов.

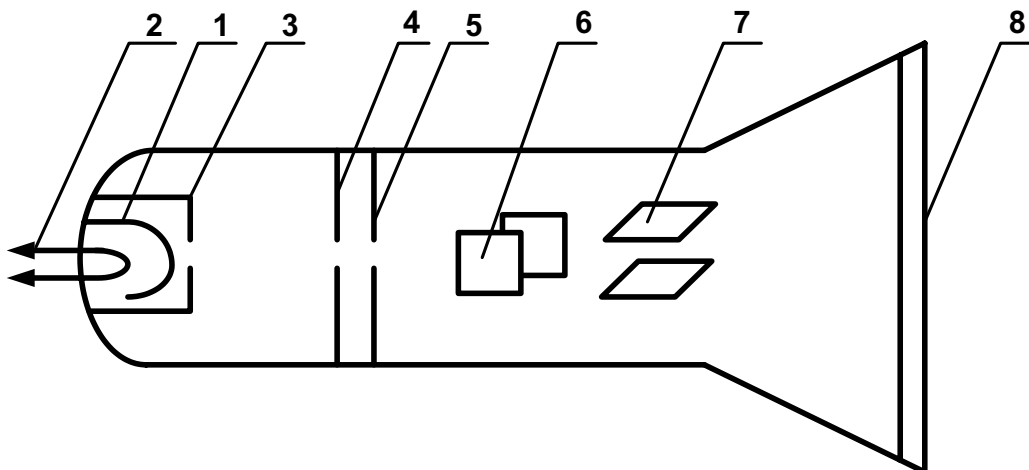


Рис. 21.1

После пересечения анода **5** электроны образуют луч, проходящий затем между двумя парами пластин **6** и **7**. Вертикально расположенные пластины **6** служат для отклонения луча в горизонтальной плоскости (пластины X), а горизонтально расположенные пластины **7** – в вертикальной плоскости (пластины Y). В отсутствие электрического поля между пластинами электронный луч не отклоняется и попадает в центр экрана **8** ЭЛТ. Поверхность экрана с внутренней стороны покрыта люминесцентным веществом, при попадании электронов на люминофор происходит его свечение.

Отклонение луча пропорционально напряжению на отклоняющих пластинах. Отклонение пятна на экране ЭЛТ, дел., вызванное напряжением 1 В на отклоняющих пластинах, называется чувствительностью осциллографа:

$$S = \frac{y}{U}, \quad [S] = \left[ \frac{\text{дел.}}{\text{В}} \right]. \quad (21.1)$$

Величина, обратная чувствительности  $S$ , называется коэффициентом отклонения  $K$ :

$$[K] = \left[ \frac{\text{В}}{\text{дел.}} \right].$$

Для того чтобы на экране осциллографа можно было увидеть, как в некотором физическом процессе величина  $y$  меняется в зависимости от изменения другой физической величины  $x$  (т.е.

$y = f(x)$ ), необходимо на горизонтально отклоняющие пластины подать напряжение  $U_x$ , пропорциональное  $x$ , а на вертикально отклоняющие пластины одновременно подать напряжение  $U_y$ , пропорциональное  $y$ . Тогда электронный луч начертит на экране кривую, соответствующую зависимости  $y = f(x)$ .

На практике часто приходится наблюдать изменение различных физических величин от времени, т.е.  $y = f(t)$ . При этом на вертикально отклоняющие пластины необходимо подать напряжение, пропорциональное исследуемой физической величине  $y$ , а на горизонтально отклоняющие пластины – напряжение, изменяющееся пропорционально времени.

Система зрения у человека инерционна, т. е. воспринимаются мелькания частотой 50 – 60 Гц, поэтому передача зрительной информации строится с учётом этой особенности. Полное однократное изображение составляет один кадр, который образуется из двух неполных изображений, так называемых полукадров, или полей. В первом поле происходит последовательная развертка всех нечетных строк изображения, во втором — всех четных строк, которые располагаются в промежутках между строками первого. Видеосигнал модулирует электронный луч ЭЛТ только во время прямого хода луча кадровой развёртки; во время обратного хода электронный луч гасится и возвращается к началу следующего поля. Частота полей выбирается равной номинальной частоте питающей электрической сети. При частоте 50 Гц кадр передаётся за  $1/25$  с, а при 60 Гц – за  $1/30$  с (соответственно одно поле — за  $1/50$  и  $1/60$  с). Если за одну секунду при частоте 50 Гц будет передано на экран 25 кадров, то человек увидит непрерывное изображение. В частности, если электронный луч неоднократно будет повторять тот же путь на экране с частотой более 50 Гц, то вследствие инерционности зрения наблюдатель увидит неподвижный график зависимости  $y = f(t)$ , который называется осциллограммой. Чаще всего осциллограмма изображает форму электрического сигнала во времени. По ней можно определить амплитуду и длительность сигнала.

Для создания напряжения, которое изменяется пропорционально времени, в осциллографе имеется генератор развертки. Для по-

лучения устойчивой картины на экране осциллографа необходимо, чтобы частота напряжения генератора развертки совпадала с частотой повторения изучаемого физического процесса или была меньше этой частоты в целое число раз. Поэтому частота напряжения, вырабатываемого генератором развертки, может меняться в широком диапазоне. С помощью специального блока синхронизации частота напряжения генератора развертки синхронизируется с исследуемым напряжением любой формы, подаваемым на вертикально отклоняющие пластины.

Известно, что вольтметр переменного напряжения измеряет эффективное значение напряжения  $U_{эф}$ , которое связано с амплитудным  $U_a$  соотношением

$$U_a = \sqrt{2} U_{эф}. \quad (21.2)$$

Использование в рабочей схеме вольтметра переменного напряжения и ЭО дает возможность провести экспериментальную проверку соотношения (21.2).

С помощью ЭО можно наблюдать сложение нескольких электрических колебаний. При сложении колебаний одного направления с близкими частотами  $\omega$  и  $\omega + \Delta\omega$  ( $\Delta\omega \ll \omega$ )

$$x_1 = a \cos \omega t,$$

$$x_2 = a \cos(\omega + \Delta\omega)t$$

результатирующее колебание описывается уравнением

$$x = x_1 + x_2 = 2a \cos \frac{\Delta\omega}{2} t \cos \omega t, \quad (21.3)$$

где  $A_{биений} = \left| 2a \cos \frac{\Delta\omega}{2} t \right|$  – амплитуда результирующего колебания.

Колебания с периодически меняющейся амплитудой, возникающие в результате наложения двух гармонических колебаний с близкими частотами, называют *биениями* (рис. 21.2).

Электронный осциллограф позволяет также наблюдать сложение взаимно перпендикулярных электрических колебаний. При сложении взаимно перпендикулярных колебаний с одинаковыми или кратными частотами на экране ЭО луч прочертит замкнутые траектории, которые называются *фигурами Лиссажу*.

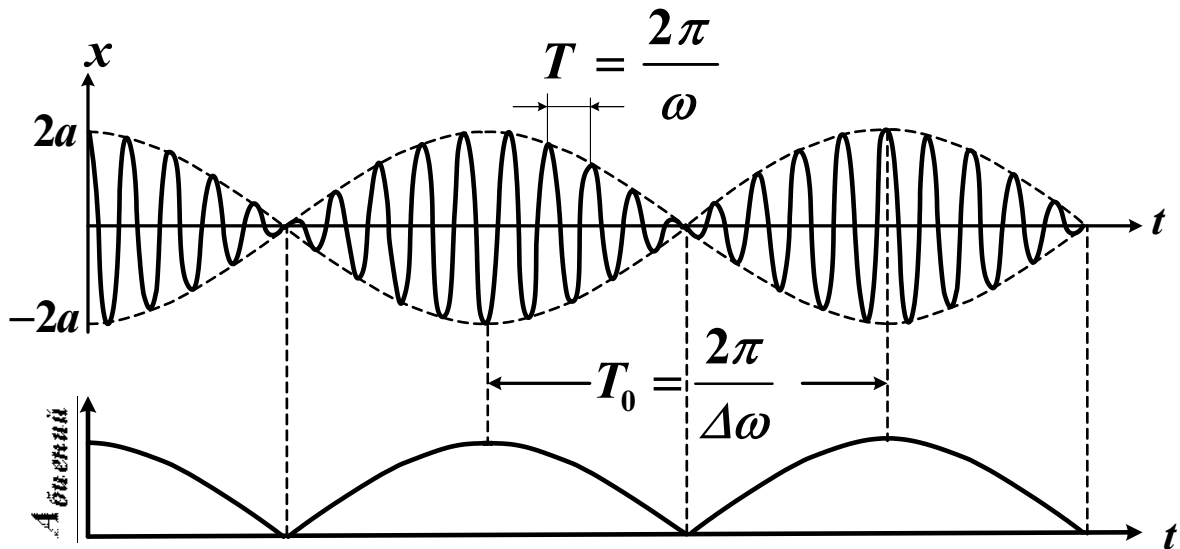


Рис. 21.2

Если складываются взаимно перпендикулярные колебания одинаковой частоты

$$x = a \cos(\omega t + \varphi_1),$$

$$y = b \cos(\omega t + \varphi_2),$$

то уравнение траектории имеет вид

$$\frac{x^2}{a^2} - 2\frac{xy}{ab} \cos(\varphi_2 - \varphi_1) + \frac{y^2}{b^2} = \sin^2(\varphi_2 - \varphi_1),$$

что является уравнением эллипса, ориентация которого зависит от разности фаз колебаний. В общем случае вид фигуры Лиссажу зависит от соотношений между частотами, фазами и амплитудами колебаний. Некоторые частные случаи фигур Лиссажу для колебаний одинаковой амплитуды и разных частот при  $\varphi_1 - \varphi_2 = \pi/2$  показаны на рис. 21.3.

### Порядок выполнения работы

#### Задание 1. Определение чувствительности ЭО

1. Ознакомиться с расположением ручек управления ЭО (схема панели управления ЭО указана на рабочем месте). Включить ЭО и после его прогрева проверить работу ручек «Яркость», «Фокус», « $\leftrightarrow$ » (смещение луча влево-вправо), « $\updownarrow$ » (смещение луча вверх-вниз).

2. Подключить ко входу ЭО источник постоянного напряжения (схема подключения указана на рабочем месте). Перевести

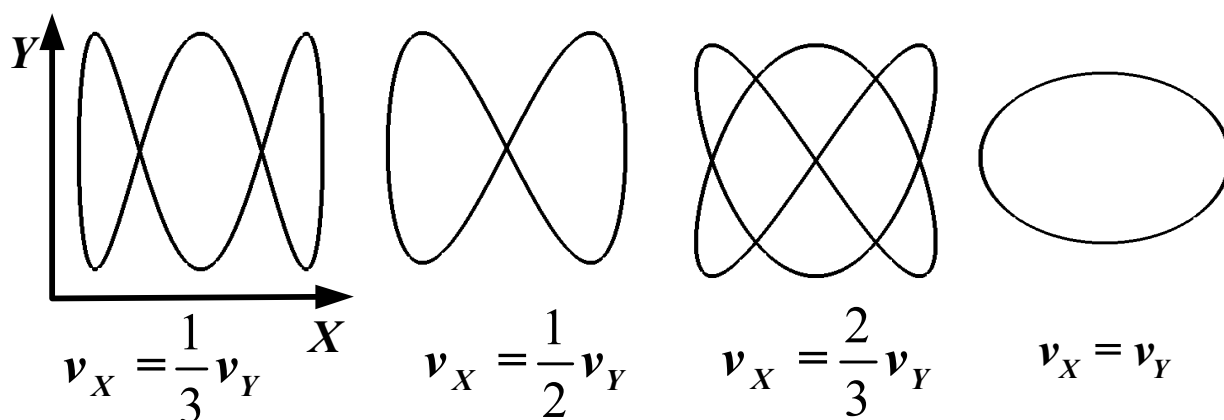


Рис. 21.3

тумблер выбора режима работы ЭО в положение « $\perp$ » (либо «За-кор.»). Наблюдать на экране ЭО светящуюся точку (либо горизонтальную прямую). Переключая тумблер выбора режима работы ЭО, наблюдать на экране смещение точки (либо горизонтальной прямой) от первоначального положения. Определив по шкале на экране ЭО смещение луча  $y$  (дел.) и величину подаваемого напряжение  $U_{эф}$  по вольтметру, вычислить чувствительность ЭО по вертикали согласно формуле

$$S = \frac{y}{U_{эф}} \sqrt{2}.$$

*Задание 2. Определение частоты и амплитуды электрических колебаний, подаваемых на ЭО. Проверка связи эффективных и амплитудных значений электрических величин переменных электрических сигналов*

1. Подать на вход ЭО гармонически изменяющееся напряжение (схема подключения указана на рабочем месте). Наблюдать на экране ЭО осциллограмму исследуемого напряжения (это будет синусоида), обеспечив ее надежную синхронизацию.
2. Измерить  $N_1$  делений по горизонтали (больших клеток) шкалы, соответствующее  $N$  периодам синусоиды.

3. Вычислить частоту подаваемого напряжения по формуле

$$\nu = \frac{N}{N_1 \tau},$$

где  $\tau$  — постоянная времени развертки ЭО.

4. Измерить в делениях шкалы амплитуду  $A$  сигнала. Вычислить амплитудное значение подаваемого напряжения по формуле

$$U_a = \frac{A}{S}.$$

Определив по вольтметру эффективное значение напряжения  $U_{эф}$  и найдя по шкале экрана ЭО  $U_a$ , проверить соотношение (21.2).

*Задание 3. Определение частоты биений при наблюдении сложения колебаний одинакового направления с близкими частотами*

1. Подключить выводы сигналов генераторов к первичной и вторичной обмоткам трансформатора (схема подключения указана на рабочем месте).
2. Включить один из генераторов. Установить определенное значение частоты и амплитуды сигнала с помощью ручек регулирования генератора.
3. Отключить первый и включить второй генератор. Установить по осциллограмме такое же значение частоты и амплитуды сигнала, как и для первого генератора.
4. Включить оба генератора. При одинаковых значениях частот и амплитуд сигналов на экране ЭО не будет происходить изменение амплитуды результирующего колебания.
5. Плавно изменяя частоту одного из генераторов, добиться возникновения на экране ЭО биений. Используя методику п. 3 задания 2, определить частоту биений  $\Delta\nu$  и частоту колебаний  $\nu$  и сравнить их между собой. Наблюдать изменения периода биений при изменении разности частот слагаемых колебаний.
6. Определить максимальное значение амплитуды результирующего колебания.

*Задание 4. Наблюдение сложения взаимно перпендикулярных колебаний*

1. Для наблюдения фигур Лиссажу с помощью ЭО необходимо подать с одного генератора сигнал на вход X, а с другого — на вход Y (при этом генератор развертки осциллографа должен быть выключен). Схема подключения указана на рабочем месте.
2. Изменяя частоту одного из генераторов, наблюдать фигуры Лиссажу, представленные на рис. 21.3.
3. Для каждой из полученных фигур зарисовать их форму, определить частоты сигналов  $\nu_x$  и  $\nu_y$ , используя методику п. 3 задания 2, а также найти отношение  $\nu_x/\nu_y$ .

**Контрольные вопросы**

*Вариант 1*

1. Объясните назначение, устройство и принцип работы электронно-лучевой трубки.
2. Что такое чувствительность осциллографа и коэффициент отклонения луча?
3. Что такое биения и в результате чего они возникают? Выведите уравнение результирующего колебания при биениях.
4. *Задача.* Как будет выглядеть на ЭО фигура Лиссажу, если на X пластины ЭО подать сигнал  $I_x = I_1 \cos \omega t$ , а на Y пластины —  $I_y = I_2 \sin \omega t$ ? Получить уравнение траектории.

*Вариант 2*

1. Для чего предназначен генератор развертки в осциллографе?
2. Выведите формулу, связывающую эффективное и амплитудное значения переменного напряжения.
3. При каких условиях возникают фигуры Лиссажу? Выведите уравнение фигуры Лиссажу, если частоты складывающихся колебаний равны.



4. *Задача.* Два электрических гармонических колебания одинаковой частоты с амплитудами  $A_1 = 0,1$  А и  $A_2 = 0,06$  А подаются на первичную обмотку трансформатора. При этом во вторичной обмотке возникают гармонические колебания с амплитудой  $A_1 = 0,14$  А. Чему равна разность фаз складываемых колебаний?

*Ответ:*  $\Delta\varphi = \pi / 3$  рад.

### *Вариант 3*

1. Каковы преимущества использования ЭО при изучении электрических сигналов по сравнению с другими электроизмерительными приборами?
2. Каким образом с помощью ЭО можно определить частоту электрических колебаний?
3. Объясните метод вращающегося вектора амплитуды при рассмотрении сложения колебаний одного направления.
4. *Задача.* На какое число делений отклонится луч на экране ЭО чувствительностью  $S = 0,5$  В/дел., если подключенный к нему вольтметр переменного напряжения показал  $I_x = I_1 \cos \omega t$ ?

*Ответ:* на одно деление.

## **Лабораторная работа № 2-22**

### **ЗАТУХАЮЩИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ**

*Цель работы* – изучение затухающих колебаний в колебательном контуре при различных величинах активного сопротивления контура и определение логарифмического декремента затухания.

*Приборы и принадлежности:* осциллограф (ЭО); генератор прямоугольных импульсов; катушка индуктивности  $L$ ; набор резисторов; конденсатор; соединительные провода.

## Теоретическое введение

Рассмотрим контур из последовательно соединенных резистора  $R$ , катушки индуктивности  $L$  и конденсатора  $C$  (рис. 22.1).

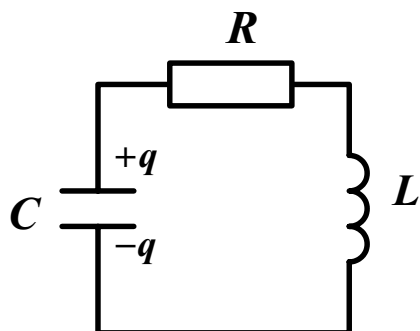


Рис. 22.1

Пусть в момент времени  $t = 0$  заряд конденсатора равен  $q_0$ . Разность потенциалов между обкладками конденсатора  $U_0 = q_0/C$ . Определим зависимость заряда конденсатора  $q$  и разности потенциалов  $U$  от времени  $t$ . Согласно закону Ома

$$IR + U = \mathcal{E}. \quad (22.1)$$

В качестве ЭДС  $\mathcal{E}$  в контуре действует ЭДС самоиндукции  $\mathcal{E}_S = -L \frac{dI}{dt}$ . Учитывая, что  $I = \frac{dq}{dt}$ , уравнение (22.1) можно записать в виде

$$R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = -L \frac{dI}{dt}. \quad (22.2)$$

Разделив (22.2) на  $L$  с учетом равенства  $\frac{dI}{dt} = \frac{d^2q}{dt^2}$ , получим

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dq}{dt} + \frac{1}{LC} q = 0, \quad \text{или} \quad \frac{d^2q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = 0, \quad (22.3)$$

где  $\beta = \frac{R}{2L}$  — коэффициент затухания;  $\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$  — собственная циклическая частота электрических колебаний в колебательном контуре. Решение уравнения (22.3) имеет вид

$$q = q_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi), \quad (22.4)$$

где  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ . Так как

$$\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2} > 0,$$

то для возбуждения колебаний необходимо выполнить условие

$$\frac{1}{LC} > \frac{R^2}{4L^2} \quad \text{или} \quad \omega_0^2 > \beta^2. \quad (22.5)$$

Разделив выражение (22.4) на емкость  $C$ , получим напряжение на конденсаторе

$$U = \frac{q_0}{C} e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi). \quad (22.6)$$

График этой функции приведен на рис. 22.2. Период затухающих колебаний

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}. \quad (22.7)$$

Очевидно, что с ростом коэффициента затухания  $\beta$  период  $T$  увеличивается.

Амплитуда колебаний напряжения, как следует из соотношения (22.6), уменьшается со временем по экспоненциальному закону (см. пунктирную линию на рис. 22.2):

$$U(t) = U_0 e^{-\beta t}. \quad (22.8)$$

Отношение амплитуд, соответствующих моментам времени, отличающимся на один период, будет

$$\frac{U(t)}{U(t+T)} = e^{\beta T}. \quad (22.9)$$

Это отношение называют *декрементом затухания*, а его натуральный логарифм – *логарифмическим декрементом затухания*, т.е.

$$\lambda = \ln \frac{U(t)}{U(t+T)} = \beta T. \quad (22.10)$$

Быстроту затухания колебаний можно также охарактеризовать временем релаксации  $\tau$ , в течение которого амплитуда колебаний уменьшается в  $e$  раз, т. е.

$$\frac{U(t)}{U(t+\tau)} = e, \quad (22.11)$$

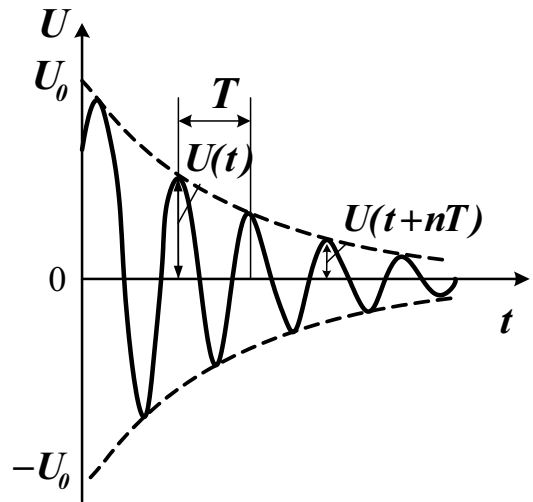


Рис. 22.2

но аналогично формуле (22.9)

$$\frac{U(t)}{U(t+\tau)} = e^{\beta\tau}. \quad (22.12)$$

Сравнив (22.11) и (22.12), получим

$$\tau = \frac{1}{\beta}, \quad (22.13)$$

тогда

$$\lambda = \beta T = \frac{T}{\tau} = \frac{1}{N_e}, \quad (22.14)$$

где  $N_e$  – число колебаний, в течение которых амплитуда уменьшается в  $e$  раз.

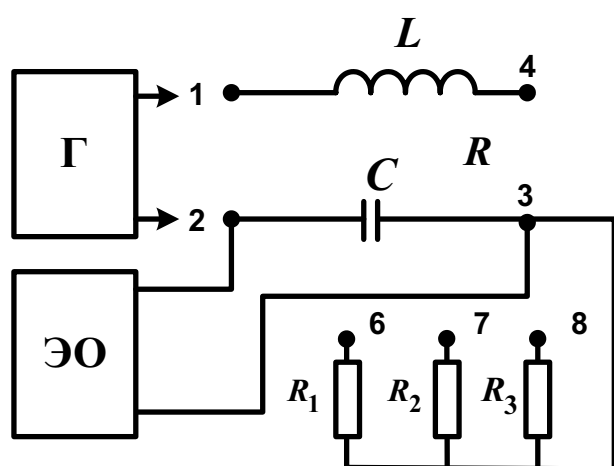


Рис. 22.3

Для экспериментального изучения затухающих электрических колебаний используется электрическая схема, представленная на рис. 22.3. На вход «1 – 2» колебательного контура подаются прямоугольные импульсы напряжения с частотой 1 кГц от генератора Г. Напряжение, снимаемое с конденсатора (между точками 2 и 3), подается на вход Y осциллографа.

Затухающие колебания, возникающие в контуре, наблюдаются на экране ЭО.

### Порядок выполнения работы

*Задание 1. Определение параметров затухающих колебаний, наблюдаемых на экране ЭО*

1. Включить питание лабораторного стенда, осциллографа, генератора.
2. Соединить перемычкой клеммы «4» и «3» (см. рис. 22.3). При этом прямоугольные импульсы от генератора подаются на коле-

батальный контур, состоящий из катушки индуктивности, величину  $L$  которой необходимо определить, конденсатора  $C = 680$  пФ, собственного активного сопротивления  $R_L$  индуктивности  $L$ .

3. Наблюдая на экране ЭО изображение сигнала, определить его период  $T$  по формуле

$$T = \frac{\tau m}{n}, \quad (22.15)$$

где  $\tau$  – длительность развертки, мкс/дел. (определяется по положению соответствующей ручки ЭО);  $m$  – число больших делений (клеток) на экране ЭО, соответствующее  $n$  периодам (рекомендуется пользоваться разверткой длительностью 20 мкс/дел.).

4. Измерить в делениях шкалы экрана ЭО амплитуды  $U(t)$  и  $U(t + nT)$  колебаний, отстоящих на  $n$  периодов, после чего рассчитать коэффициент затухания  $\beta$  по выражению

$$\beta = \frac{1}{nT} \ln \frac{U(t)}{U(t + nT)}. \quad (22.16)$$

5. По полученным  $T$  и  $\beta$  рассчитать логарифмический декремент затухания  $\lambda$  по соотношению

$$\lambda = \beta T. \quad (22.17)$$

Результаты измерений и вычислений занести в табл. 22.1.

*Задание 2. Определение индуктивности  $L$  и активного сопротивления  $R_L$  катушки индуктивности*

1. По известному значению емкости конденсатора  $C$  и данным, полученным в задании 1, рассчитать индуктивность  $L$  и активное сопротивление  $R_L$  катушки индуктивности по формулам

$$L = \frac{T^2}{4\pi^2 C}, \quad R_L = 2\beta L. \quad (22.18)$$

Результаты занести в табл. 22.1.

Таблица 22.1

Параметры затухающих колебаний	Соединение клемм			
	«4» – «3» $R_{доб} = 0$	«4» – «6» $R_{доб} = R_1$	«4» – «7» $R_{доб} = R_2$	«4» – «8» $R_{доб} = R_3$
Длительность развертки $\tau$ , с				
Число больших делений $m$				
Число периодов $n$				
Период $T$ , с				
Коэффициент затухания $\beta$ , с <sup>-1</sup>				
Логарифмический декремент затухания $\lambda$				
Индуктивность $L$ , Гн				
Сопротивление катушки $R_L$ , Ом				

*Задание 3. Изучение зависимости параметров затухающих колебаний от сопротивления контура*

1. Отключить переключку клемм «4» и «3». Соединить переключкой клеммы «4» и «6», при этом в колебательном контуре  $R_1 = 200$  Ом. Определить период, коэффициент затухания и логарифмический декремент затухающих колебаний, используя методику задания 1.
2. Повторить опыт и рассчитать параметры затухающих колебаний для случаев, когда переключка соединяет клеммы «4» и «7» ( $R = R_L + R_2$ ), а также клеммы «4» и «8» ( $R = R_L + R_3$ ), результаты занести в табл. 22.1 ( $R_2 = 600$  Ом,  $R_3 = 1100$  Ом).
3. Построить график  $\lambda = \lambda(R)$ . Сделать выводы.

## Контрольные вопросы

### Вариант 1

1. Объясните, как происходит возникновение затухающих электрических колебаний в колебательном контуре.
2. Запишите дифференциальное уравнение затухающих электрических колебаний и его решение.
3. Изобразите графически процесс изменения тока в цепи, в которой возникают затухающие электрические колебания.
4. *Задача.* Через сколько времени амплитуда колебаний напряжения на конденсаторе в реальном колебательном контуре уменьшится в 2 раза, если  $L = 0,1$  мГн,  $C = 4$  мкФ,  $R = 2$  Ом.

*Ответ:*  $t = 69,3$  мкс.

### Вариант 2

1. Что такое коэффициент затухания? От чего он зависит?
2. Каким образом в колебательном контуре можно получить монотонное уменьшение заряда конденсатора, т.е. отсутствие колебаний?
3. Что такое логарифмический декремент затухания? Чему он равен, если известны  $R$ ,  $L$  и  $C$  колебательного контура?
4. *Задача.* Найти время одного колебания амплитуды напряжения на конденсаторе в реальном колебательном контуре, если  $L = 0,2$  мГн,  $C = 2$  мкФ,  $R = 0,5$  Ом.

*Ответ:*  $t = 126$  мкс.

### Вариант 3

1. Вывести уравнение затухающих электрических колебаний.
2. Что такое время релаксации электрических колебаний? Чему оно равно, если известны  $R$ ,  $L$  и  $C$  колебательного контура?
3. Объясните зависимость  $\lambda = \lambda(R)$  на примере графика, полученного в задании 3.
4. *Задача.* Чему равна емкость конденсатора в реальном колебательном контуре, если  $L = 0,4$  мГн,  $R = 1$  Ом. Период колебаний напряжения на конденсаторе  $T = 200$  мкс.

*Ответ:*  $C = 2,5$  мкФ.

## Лабораторная работа № 2-23

### ИЗУЧЕНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ

*Цель работы* – изучение вынужденных колебаний и резонанса токов и напряжений в цепи, содержащей емкость, индуктивность и омическое сопротивление.

*Приборы и принадлежности:* генератор Л-31; конденсаторы  $C_1$  и  $C_3$  с известной емкостью и конденсатор  $C_2$  с неизвестной емкостью; катушка индуктивности  $L$  с собственным активным сопротивлением  $R$ ; цифровой вольтметр В7-16А; цифровой ампервольтметр В7-21А.

#### Теоретическое введение

Чтобы вызвать в электрической цепи, содержащей емкость, катушку индуктивности и омическое сопротивление, вынужденные колебания тока, достаточно включить последовательно с элементами цепи источник переменного напряжения (рис. 23.1), величина которого

$$U = U_m \cos \omega t. \quad (23.1)$$

Запишем дифференциальное уравнение вынужденных колебаний:

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = \frac{U_m}{L} \cos \omega t, \quad (23.2)$$

где  $\beta = \frac{R}{2L}$  – коэффициент затухания;

$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  – циклическая частота собственных колебаний.

Частное решение уравнения (23.3) имеет вид

$$q = q_m \cos(\omega t - \psi), \quad (23.3)$$

где

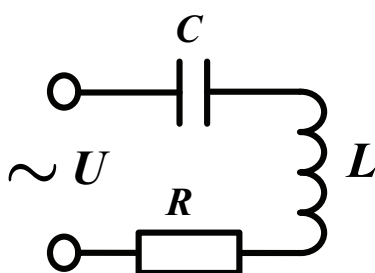


Рис. 23.1



$$q_m = \frac{U_m}{L\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2}}, \quad \operatorname{tg}\psi = \frac{2\beta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}.$$

Продифференцировав выражение (23.3) по  $t$ , найдем силу тока в контуре при установившихся колебаниях:

$$I = -\omega q_m \sin(\omega t - \psi) = I_m \cos(\omega t - \varphi), \quad (23.4)$$

где  $I_m = \omega q_m$ ;  $\varphi = \psi - \frac{\pi}{2}$  – сдвиг по фазе между током и приложенным напряжением.

В соответствии с равенством (23.4)

$$U_R = R I_m \cos(\omega t - \varphi). \quad (23.5)$$

Разделив выражение (23.3) на емкость конденсатора, получим напряжение на конденсаторе

$$U_C = \frac{q_m}{C} \cos(\omega t - \psi) = U_{Cm} \cos(\omega t - \varphi - \frac{\pi}{2}). \quad (23.6)$$

Умножив производную функции (23.4) на  $L$ , получим напряжение на катушке индуктивности

$$U_L = L \frac{dI}{dt} = -\omega L I_m \sin(\omega t - \varphi) = U_{Lm} \cos(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2}), \quad (23.7)$$

где

$$U_{Lm} = \omega L I_m.$$

Сопоставление формул (23.4) – (23.7) показывает, что напряжение на емкости отстает по фазе от тока на  $\pi/2$ , а напряжение на индуктивности опережает ток на  $\pi/2$ . Напряжение на активном сопротивлении изменяется в фазе с током.

Резонансная частота для заряда  $q$  и напряжения на конденсаторе  $U_C$  будет

$$\omega_{\text{рез}} = \omega_{U_{\text{рез}}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2} < \omega_0. \quad (23.8)$$

Резонансные кривые для  $U_C$  при различных значениях коэффициента затухания  $\beta$  изображены на рис. 23.2 (резонансные кривые для  $q$  имеют такой же вид). При  $\omega \rightarrow 0$  резонансные кривые сходятся в одной точке с ординатой  $U_{Cm} = U_m$ , равной напряжению, возникающему на конденсаторе при подключении его к источнику

постоянного напряжения  $U_m$ . Максимум при резонансе получается тем выше и острее, чем меньше  $\beta$ , т.е. чем меньше активное сопротивление и больше индуктивность контура.

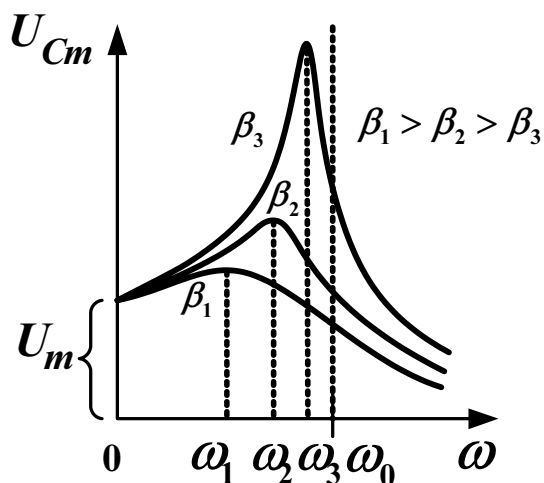


Рис. 23.2

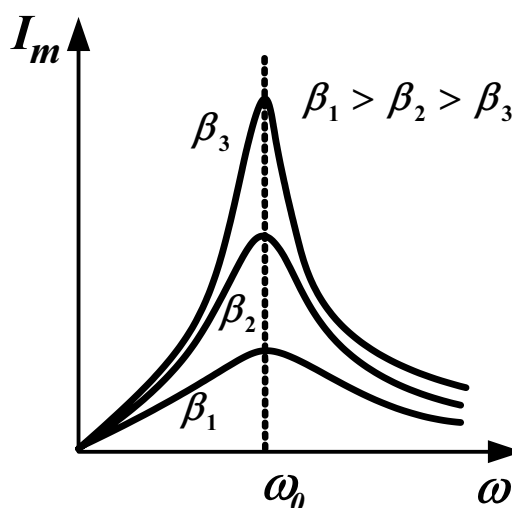


Рис. 23.3

Амплитуда силы тока имеет максимальное значение при  $\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0$ . Следовательно, резонансная частота для силы тока совпадает с собственной частотой контура  $\omega_0$ :

$$\omega_{I_{рез}} = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (23.9)$$

Резонансные кривые для силы тока показаны на рис. 23.3. Из рисунка видно, что при  $\omega = 0$  сила тока  $I_m = 0$  (при постоянном напряжении установившийся ток в цепи с конденсатором течь не может).

### Порядок выполнения работы

*Задание 1. Изучение зависимости силы тока в колебательном контуре от частоты источника*

1. Собрать схему в соответствии с рис. 23.4. В качестве емкости использовать конденсатор  $C_1 = 0,22 \text{ мкФ}$ . При монтаже схемы обратить внимание на то, чтобы «нулевые» клеммы всех приборов были соединены вместе. Ампервольтметр В7-21А переключить в режим измерений переменного тока. Генератор Л-31 включить в режим генерации синусоидальных колебаний.

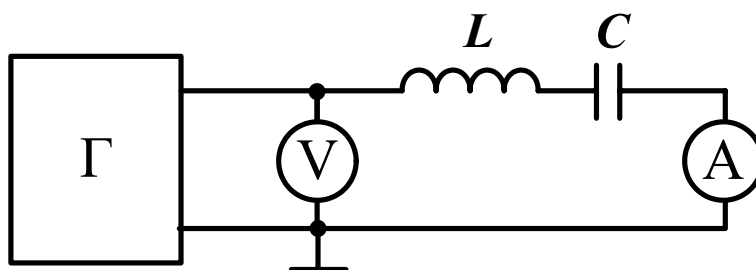


Рис. 23.4

2. Включить питание приборов. Установить выходное напряжение генератора Л-31 равным 1В путем вращения ручки регулирования «Уровень» и поддерживать его постоянным в ходе измерений. Изменяя частоту колебаний с помощью ручки регулировки на генераторе, по показаниям ампервольтметра В7-21А добиться максимального значения силы тока. Определить при этом резонансную частоту силы тока  $\nu_{01}$ .
3. Последовательно заменяя конденсатор  $C_1$  конденсаторами  $C_2$  и  $C_3 = 0,068$  мкФ и проводя аналогичные измерения, найти резонансные частоты токов  $\nu_{02}$  и  $\nu_{03}$ .
4. По полученным значениям резонансных частот  $\nu_{01}$ ,  $\nu_{02}$  и  $\nu_{03}$  вычислить величины емкости  $C_2$  и индуктивности  $L$ . Для этого проделать следующее:
  - рассчитать циклические частоты  $\omega_{0i} = 2\pi\nu_{0i}$ ;
  - найти значения  $1/\omega_{0i}^2$  (результаты занести в табл. 23.1);
  - нанести на графике  $1/\omega_{0i}^2 = f(C_i)$  точки, соответствующие  $C_1$  и  $C_3$ .

Таблица 23.1

$C_i$	$\nu_{0i}$	$\omega_{0i}$	$1/\omega_{0i}^2$
$C_1$			
$C_2$			
$C_3$			

Из формулы 23.9 следует, что

$$L = \frac{\Delta\left(\frac{1}{\omega_0^2}\right)}{\Delta C}, \quad (23.10)$$

где  $\Delta\left(\frac{1}{\omega_0^2}\right)$  — изменение  $\left(\frac{1}{\omega_0^2}\right)$  при соответствующем изменении емкости конденсатора на величину  $\Delta C$ . Теоретически зависимость  $\frac{1}{\omega_0^2} = f(C)$  должна быть линейной (рис. 23.5).

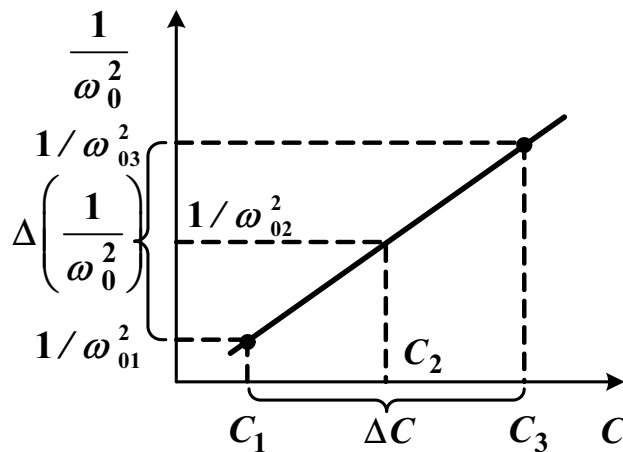


Рис. 23.5

Экспериментальные точки  $\left(\frac{1}{\omega_{01}^2}, C_1\right)$  и  $\left(\frac{1}{\omega_{03}^2}, C_3\right)$  наносятся на график и экстраполируются линейной зависимостью. По графику определяется ордината  $\frac{1}{\omega_{02}^2}$  и соответствующее ей значение абсциссы  $C_2$ .

Пользуясь формулой (23.10), по полученному графику определяется индуктивность катушки  $L$ .

*Задание 2. Изучение зависимости напряжения на конденсаторе от частоты источника*

1. Собрать схему в соответствии с рис. 23.6. В качестве емкости использовать конденсатор  $C_3$ . При монтаже схемы обратить внимание на то, чтобы «нулевые» клеммы всех приборов были соединены вместе. Ампервольтметр В7-21А переключить в режим измерения переменного напряжения. Генератор Л-31 включить в режим генерации синусоидальных колебаний.

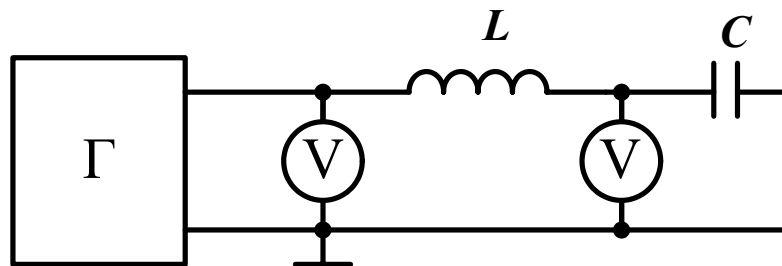


Рис. 23.6

2. Включить питание приборов. Установить выходное напряжение генератора Л-31 равным 1 В путем вращения ручки регулирования «Уровень» и поддерживать его постоянным в ходе измерений. Изменяя частоту колебаний с помощью ручки регулировки на генераторе, по показаниям ампервольтметра В7-21А добиться максимального значения напряжения на конденсаторе. Определить при этом резонансную частоту напряжения  $\nu_{рез}$  на конденсаторе.
3. Рассчитать циклическую резонансную частоту  $\omega_{рез} = 2\pi \nu_{рез}$ .
4. Используя полученное при выполнении задания 1 значение резонансной частоты тока  $\omega_{03}$  и учитывая формулу (23.8), вычислить по различию частот  $\omega_{рез}$  и  $\omega_{03}$  коэффициент затухания  $\beta$  по формуле

$$\beta = \sqrt{\frac{\omega_0^2 - \omega_{рез}^2}{2}}.$$

5. Учитывая, что  $\beta = R/2L$ , по полученному в задании 1 значению индуктивности  $L$  и рассчитанной в настоящем задании величине  $\beta$  определить омическое сопротивление цепи  $R = 2\beta L$ .

### Контрольные вопросы

#### Вариант 1

1. Какие колебания называются вынужденными? Как возбуждаются незатухающие колебания в колебательном контуре?

2. Что называется коэффициентом затухания  $\beta$  колебательного контура?
3. Запишите значение сдвига фаз между током и напряжением на конденсаторе.
4. *Задача.* В состав колебательного контура входят катушка индуктивности  $L = 20$  мкГн, конденсатор емкостью  $C = 0,08$  мкФ. Определить длину волны, на которой резонирует контур.  
*Ответ:*  $\lambda = 2384$  м.

### *Вариант 2*

1. Объясните методику определения емкости конденсатора  $C$ , используя несколько конденсаторов известной емкости и катушку индуктивности.
2. Что называется резонансом тока и при каком условии он достигается? Изобразите соответствующий график.
3. Каков сдвиг фаз между током и напряжением на индуктивности?
4. *Задача.* В состав колебательного контура входят конденсатор емкостью  $C = 5$  мкФ, катушка индуктивности  $L = 0,2$  Гн. Определить максимальную силу тока  $I_m$  в контуре, если максимальная разность потенциалов на обкладках конденсатора  $U_m = 90$  В. Омическим сопротивлением  $R$  контура пренебречь.  
*Ответ:*  $I_m = 0,45$  А.

### *Вариант 3*

1. Получите дифференциальное уравнение вынужденных колебаний в колебательном контуре.
2. Чему равна резонансная частота для напряжения на конденсаторе?
3. Как выделяется электромагнитное колебание нужной длины волны в радиоприемных устройствах?
4. *Задача.* Чему должна быть равна емкость конденсатора колебательного контура, чтобы можно было настроить приемник на частоту  $\nu = 106,6$  МГц, если  $L = 2$  мкГн,  $R = 20$  Ом?  
*Ответ:*  $C = 1,1$  пкФ.

## Лабораторная работа № 2-24

### ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ПРОВОДЯЩИХ СРЕДАХ

*Цель работы* – изучение закономерностей распространения электромагнитного поля в проводящих средах; определение толщины скин-слоя в зависимости от частоты переменного электромагнитного поля внутри проводников.

*Приборы и принадлежности* – генератор; соленоид; измерительная катушка; милливольтметр; полые цилиндрические металлические экраны с различной толщиной стенок.

#### Теоретическое введение

При прохождении по проводнику постоянного тока сила тока постоянна и при этом не изменяется во времени магнитное поле внутри проводника. При прохождении по проводнику переменного тока магнитное поле внутри проводника изменяется во времени и в проводнике возникают вихревые токи самоиндукции. Для цилиндрического проводника вихревые токи лежат в плоскостях, проходящих через ось цилиндра. Направление токов можно определить по правилу Ленца. На рис. 24.1, а показано направление вихревых токов при возрастании основного тока, а на рис. 24.1, б – при его убывании. В обоих случаях вихревые токи направлены таким образом, что они противодействуют изменению основного тока внутри проводника и способствуют его изменению вблизи поверхности. Чем дальше от оси провода, тем больше ам-

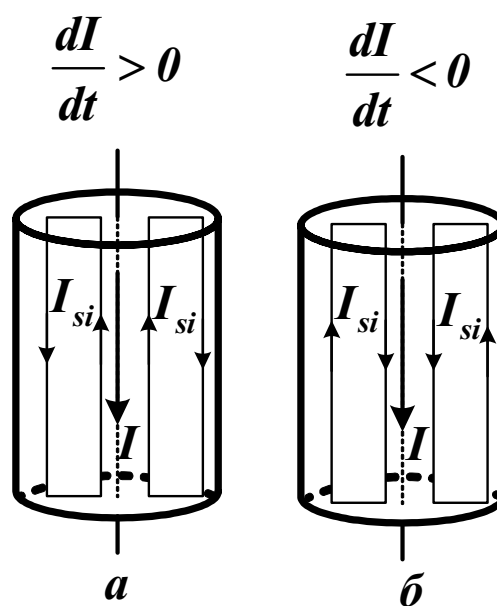


Рис. 24.1

плиты таким образом, что они противодействуют изменению основного тока внутри проводника и способствуют его изменению вблизи поверхности. Чем дальше от оси провода, тем больше ам-

плитуда колебаний силы тока. Максимальной плотность переменного тока будет у поверхности проводника и минимальной – на его оси. Такое перераспределение тока по сечению провода получило название *скин-эффекта* (от англ. *skin* – кожа).

Для теоретического описания скин-эффекта и определения толщины скин-слоя (глубины проникновения поля в металлический проводник) рассмотрим распространение электромагнитного поля в однородной проводящей неферромагнитной среде, в которой отсутствуют электрические заряды (при этом диэлектрическая и магнитная проницаемости  $\varepsilon = \mu = 1$ , объемная плотность заряда в среде  $\rho_{своб} = 0$ , удельная электрическая проводимость среды  $\sigma = const$ ).

Электромагнитная волна в общем случае описывается системой уравнений Максвелла:

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \quad \operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j}_{np} + \vec{j}_{см}; \quad \operatorname{div} \vec{D} = \rho_{своб}; \quad \operatorname{div} \vec{B} = 0. \quad (24.1)$$

$$\text{Кроме того, } \vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}, \quad \vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}, \quad \vec{j}_{np} = \sigma \vec{E}, \quad \vec{j}_{см} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}.$$

С учетом выбранных свойств среды, в которой происходит распространение электромагнитной волны, произведя преобразования, получим уравнения для  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$ :

$$\Delta \vec{E} = \mu_0 \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}; \quad \Delta \vec{H} = \mu_0 \sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}. \quad (24.2)$$

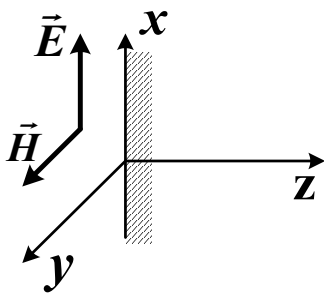


Рис. 24.2

Рассмотрим распространение плоской монохроматической волны в проводящей среде в направлении  $z > 0$  (рис. 24.2), считая амплитуду напряженности магнитного поля на границе  $z = 0$  заданной и равной  $H_0$ .

В этом случае уравнение магнитного поля одномерной плоской волны может быть записано так:

$$\frac{\partial^2 \vec{H}(z, t)}{\partial z^2} = \mu_0 \sigma \frac{\partial \vec{H}(z, t)}{\partial t}. \quad (24.3)$$

Решение этого уравнения имеет вид



$$H(z,t) = H_0 e^{-z/\gamma} \cos(\omega t - \frac{z}{\gamma}), \quad (24.4)$$

где

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{\pi \mu_0 \sigma \nu}}; \quad (24.5)$$

$H_0 e^{-z/\gamma}$  – закон изменения амплитуды вдоль оси  $z$ ;  
 $\cos(\omega t - \frac{z}{\gamma})$  определяет изменение напряженности магнитного по-

ля во времени в данной точке среды;  $\omega = 2\pi\nu$  – циклическая частота электромагнитного поля;  $\nu$  – частота электромагнитного поля.

Из выражения (24.4) следует, что амплитуда напряженности магнитного поля экспоненциально убывает вглубь проводника. Амплитуда поля уменьшается в  $e$  раз на расстоянии  $z = \gamma$  от поверхности проводящей среды. Это расстояние  $\gamma$  называется *толщиной скин-слоя*.

Напряженность электрического поля волны всегда перпендикулярна напряженности магнитного поля. Электрическое поле затухает по такому же закону, как и магнитное поле. Поэтому практически весь ток сосредоточен в скин-слое толщиной  $\gamma$ . Глубина проникновения электромагнитного поля в вещество согласно (24.5) зависит как от частоты изменения электромагнитного поля, так и от проводящих свойств среды. Возьмем в качестве примера медь, для которой  $\sigma = 57 \cdot 10^7$  См/м. Для «городского» тока ( $\nu = 50$  Гц)  $\gamma = 3$  мм, а для тока частотой  $\nu = 5$  кГц  $\gamma = 0,3$  мм, для электромагнитных волн бытовой микроволновой печи частотой  $\nu = 2,2$  ГГц толщина скин-слоя  $\gamma = 45$  мкм. Для фарфора с  $\sigma = 10^{-12}$  См/м при такой же частоте микроволн эта толщина  $\gamma = 10$  км. Таким образом, токи высокой частоты текут только в поверхностном слое проводника.

Схема установки для изучения затухания электромагнитного поля изображена на рис. 24.3.

Переменное электромагнитное поле низкой частоты создаётся внутри протяженного соленоида **1** при подключении к нему генератора **2** (типа ГЗ-24). Силовые линии магнитного поля при этом ориентированы параллельно оси соленоида. Внутри соленоида расположен металлический экран **3**, толщина стенок которого указана на нем.

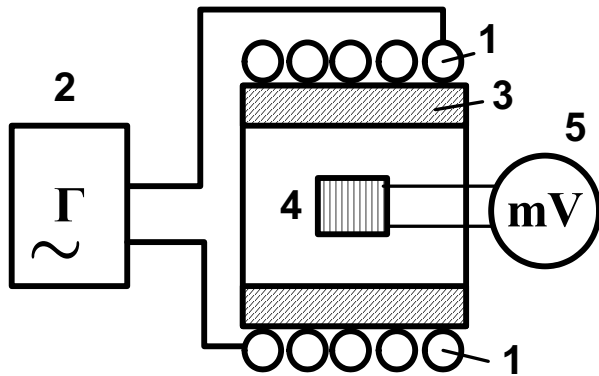


Рис. 24.3

Напряженность магнитного поля на оси соленоида измеряется по величине ЭДС индукции, наведенной в измерительной катушке **4**. Величина ЭДС фиксируется милливольтметром переменного тока **5** (типа МВЛ-2М).

По закону Фарадея величина ЭДС индукции, наведенной в измерительной катушке **4**, будет

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{d}{dt}[B_0 SN \cos \omega t] = 2\pi\nu\mu_0 SN H_0 \sin \omega t = \mathcal{E}_0 \sin \omega t,$$

где  $\mathcal{E}_0 = 2\pi\nu\mu_0 SN H_0 = kH_0$  – амплитуда ЭДС;  $S$  – площадь поперечного сечения измерительной катушки;  $N$  – число витков измерительной катушки;  $H_0$  – амплитуда напряженности магнитного поля на оси соленоида.

Амплитуда  $H_0$  на оси соленоида зависит от проводящих свойств металлического экрана и толщины его стенок. Поэтому отношение ЭДС, измеренных при наличии металлического экрана и его отсутствии, равно отношению амплитуд напряженности магнитного поля снаружи и внутри экрана:

$$\frac{\mathcal{E}(z)}{\mathcal{E}_0} = \frac{H(z)}{H_0} = e^{-z/\gamma} = e^{-z\sqrt{\pi\mu_0\sigma\nu}}. \quad (24.6)$$

Из формул 24.5 и 24.6 следует, что

$$\gamma_{\text{экс}} = \frac{\Delta z}{\Delta \ln \frac{\mathcal{E}_0}{\mathcal{E}(z)}}, \quad (24.7)$$

где  $\Delta z$  – приращение  $z$  при соответствующем изменении логарифма на величину  $\Delta \ln \dots$ . Теоретически зависимость  $\ln \frac{\mathcal{E}_0}{\mathcal{E}(z)} = f(z)$

должна быть линейной, однако из-за погрешности измерений возникают отклонения экспериментальных точек от линейной зависимости (рис. 24.4). Поэтому экспериментальные точки наносятся на график и графически экстраполируются линейной зависимостью. Далее, пользуясь формулой (24.7), по полученному графику определяется толщина скин-слоя  $\gamma_{экс}$ .

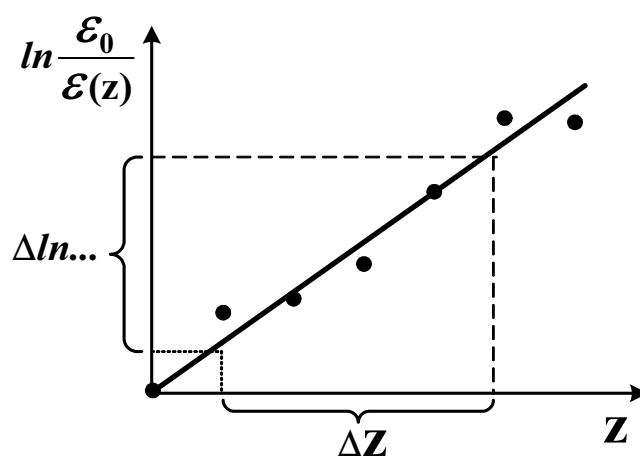


Рис. 24.4

### Порядок выполнения работы

*Задание 1. Определение толщины скин-слоя в зависимости от частоты переменного электромагнитного поля внутри проводников*

1. Включить генератор. Подать в обмотку соленоида сигнал частотой, указанной преподавателем (обычно  $\nu = 50$  Гц). Измерить ЭДС  $\mathcal{E}_0$ , индуцированную в измерительной катушке 4. Результаты занести в табл. 24.1.

Таблица 24.1

$\nu$ , Гц	$\mathcal{E}_0$ , В	$z$ , мм	1	1,5	2	3	$\gamma_{\text{экс}}$	$\gamma_{\text{теор}}$
		$\mathcal{E}(z)$ , В						
		$\frac{\mathcal{E}_0}{\mathcal{E}(z)}$						
		$\ln \frac{\mathcal{E}_0}{\mathcal{E}(z)}$						

- Установить экран с толщиной стенки  $z = 1$  мм. Определить величину ЭДС  $\mathcal{E}(z_1)$ . Аналогичные измерения проделать с экранами толщиной 1,5; 2; 3 мм. Рассчитать  $\frac{\mathcal{E}_0}{\mathcal{E}(z)}$  и  $\ln \frac{\mathcal{E}_0}{\mathcal{E}(z)}$ . Данные занести в табл. 24.1.
- Построить график зависимости  $\ln \frac{\mathcal{E}_0}{\mathcal{E}(z)} = f(z)$ . По графику определить  $\gamma_{\text{экс}} = \frac{\Delta z}{\Delta f(z)}$  для данного значения частоты  $\nu$ .
- Сравнить экспериментальное значение толщины скин-слоя  $\gamma_{\text{экс}}$  с теоретическим  $\gamma_{\text{теор}}$ , которое рассчитывается по формуле 24.5 (для алюминия  $\sigma = 3,6 \cdot 10^7$  См/м).
- Установить другое значение частоты по указанию преподавателя и проделать пп. 1 – 4.
- Сделать выводы.

### Контрольные вопросы

#### Вариант 1

- Что называется скин-эффектом и при каких условиях он возникает?
- Напишите систему уравнений Максвелла для электромагнитной волны в вакууме. Объясните физический смысл каждого из уравнений.

3. Как осуществить экранировку от внешних электромагнитных полей?

4. *Задача.* Чему равна объемная плотность зарядов, которые образуют в вакууме поле с напряженностью  $\vec{E} = \alpha \vec{r}$  ( $\alpha$  – постоянная,  $\vec{r}$  – радиус-вектор)?

*Ответ:*  $\rho = 3\varepsilon_0\alpha$ .

### *Вариант 2*

1. Какими параметрами определяется глубина проникновения электромагнитной волны в металле?

2. Напишите систему уравнений Максвелла в дифференциальной форме. Объясните физический смысл каждого из уравнений.

3. Как экспериментально можно определить толщину скин-слоя в металлическом проводнике?

4. *Задача.* Напряженность электрического поля в вакууме определяется выражением  $\vec{E} = -a(y\vec{i} - x\vec{j})$ , где  $a = \text{const}$ . Определить характер силовых линий этого поля (вычислить  $\text{rot } \vec{E}$ ), а также наличие источников (стоков) электрического поля (вычислить  $\text{div } \vec{E}$ ).

*Ответ:*  $\text{rot } \vec{E} = 2a\vec{k}$ ,  $\text{div } \vec{E} = 0$ .

### *Вариант 3*

1. Почему при прохождении токов высокой частоты можно использовать полые проводники?

2. Напишите волновые уравнения для напряженности электрического и магнитного полей при прохождении электромагнитной волны в проводящей среде.

3. Запишите выражение для толщины скин-слоя.

4. *Задача.* Определить для алюминия толщину слоя, при прохождении которого амплитуда колебаний напряженности электрического поля электромагнитной волны частотой  $\nu = 5,5$  кГц уменьшается в 2 раза.

*Ответ:*  $\gamma = 1,1$  мм.

## Библиографический список

Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. – М.: Высш. шк., 1989. – 607 с.

Савельев И.Б. Курс общей физики: В 3 т. – М.: Наука, 1989. – Т. 2: Электричество. Колебания и волны. Волновая оптика.- 479 с.

Сивухин Д.В. Общий курс физики: В 6 т. – М.: Наука, 1983.– Т. 3: Электричество. – 688 с.

Головко Д.Б., Ментківський Ю.Л. Загальні основи фізики. Електродинаміка: Навч. посібник. – К.: Либідь, 1994. – 128 с.

Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики: В 3 т. – М.: Физматгиз, 1969. – Т. 2: Электричество и магнетизм. – 366 с.

Астахов А.В., Широков Ю.М. Курс физики: В 2 т. – М.: Наука, 1980. – Т. 2: Электромагнитное поле. – 359 с.

Яворский Б.М., Пинский А.А. Основы физики: Учеб. пособие. – В 2 т. – М.: Наука, 1981.– Т. 1: Механика. Молекулярная физика. Электродинамика. – 480 с.

Виноградов Ю.К. Практикум по физике. Электричество и магнетизм: Учеб. пособие для втузов. – М.: Высш. шк., 1991. – 150 с.

Иверонова И.В. Физический практикум по физике. Электричество и оптика. – М.: Наука, 1968. – 806 с.

Черкашин В.П. Физика. Электричество и магнетизм: Учеб. пособие для вузов. – К.: Вища шк., 1986. – 168 с.

Гольдин Л.Л. Лабораторные занятия по физике: Учеб. пособие. – М.: Наука, 1983. – 704 с.

Базакуца В.А. Лабораторный практикум по физике: В 2 ч. – Х.: ХГУ, 1969. – Ч. 1. – 244 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	3
Электрические измерения и приборы.....	4
Лабораторная работа № 2-01. Исследование электростатических полей методом моделирования.....	9
Лабораторная работа № 2-02. Изучение электрических свойств сегнетоэлектриков.....	15
Лабораторная работа № 2-03. Определение электрической емкости конденсатора с помощью баллистического гальванометра.....	22
Лабораторная работа № 2-04. Изучение процессов зарядки и разрядки конденсатора.....	28
Лабораторная работа № 2-05. Определение ЭДС источника постоянного тока компенсационным методом.....	36
Лабораторная работа № 2-06. Расширение пределов измерения микроамперметра.....	42
Лабораторная работа № 2-07. Определение удельного сопротивления проводника.....	47
Лабораторная работа № 2-08. Определение работы выхода электронов из металла.....	54
Лабораторная работа № 2-09. Определение коэффициента вторичной эмиссии.....	58
Лабораторная работа № 2-10. Определение удельного заряда электрона методом магнетрона.....	63
Лабораторная работа № 2-11. Изучение эффекта Холла.....	70
Лабораторная работа № 2-12. Изучение магнитного поля соленоида и определение магнитной постоянной.....	76
Лабораторная работа № 2-13. Изучение магнитного поля соленоида и системы двух соленоидов.....	82
Лабораторная работа № 2-14. Изучение магнитного поля методом Столетова.....	89
Лабораторная работа № 2-15. Изучение закона электромагнитной индукции.....	97
Лабораторная работа № 2-16. Определение угла магнитного наклона с помощью земного индуктора.....	102

Лабораторная работа № 2-17. Измерение переменного тока с помощью пояса Роговского.....	109
Лабораторная работа № 2-18. Изучение явления самоиндукции.....	115
Лабораторная работа № 2-19. Определение индуктивности соленоида.....	122
Лабораторная работа № 2-20. Изучение магнитных свойств ферромагнетиков.....	128
Лабораторная работа № 2-21. Наблюдение электрических колебаний с помощью электронного осциллографа.....	137
Лабораторная работа № 2-22. Затухающие электрические колебания.....	145
Лабораторная работа № 2-23. Изучение вынужденных электромагнитных колебаний.....	152
Лабораторная работа № 2-24. Изучение закона распространения электромагнитных волн в проводящих средах.....	159
Библиографический список.....	166



**Лунев Игорь Валентинович  
Воронович Даниил Александрович  
Гресь Валерия Юрьевна  
Подшивалова Оксана Владимировна**

## **ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ**

**Редактор Т.В. Савченко**

Св. план, 2008

Подписано в печать 14.01.2008

Формат  $60 \times 84^{1/16}$ . Бум. офс. № 2. Офс. печ.

Усл. печ. л. 9,4. Уч.-изд. л. 10,56. Т. 100 экз. Заказ 62. Цена свободная

---

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского

"Х а р ь к о в с к и й а в и а ц и о н н ы й и н с т и т у т"

61070, Харьков-70, ул. Чкалова, 17

<http://www.khai.edu>

Издательский центр "Х А И"

61070, Харьков-70, ул. Чкалова, 17

[izdat@khai.edu](mailto:izdat@khai.edu)