



**Некоммерческое
акционерное
общество**

**АЛМАТИНСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ЭНЕРГЕТИКИ
И СВЯЗИ**

**Кафедра технической
физики**

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК. МАГНЕТИЗМ

Методические указания к выполнению лабораторных работ
для студентов всех специальностей

Алматы 2017

СОСТАВИТЕЛИ: Т.С. Байпакбаев, Ж. Искаков, С.Н. Сарсенбаева.
Электрический ток. Магнетизм. Методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов всех специальностей. - Алматы: АУЭС, 2017.- 38 с.

Методические указания содержат описания семи лабораторных работ, в каждой из которых, даны теория работы, описание экспериментальной установки, порядок проведения эксперимента, указания к оформлению отчета, а также перечень контрольных вопросов и в конце приведен список литературы.

Методические указания предназначены для студентов всех специальностей и всех форм обучения.

Ил. 23, табл. 11, библиогр. - 6 назв.

Рецензент: У.М. Матаев

Печатается по плану издания некоммерческого акционерного общества «Алматинский университет энергетики и связи» на 2017г.

© НАО «Алматинский университет энергетики и связи», 2017 г.

Введение

Настоящие методические указания содержат описания лабораторных работ раздела «Электрический ток. Магнетизм» и посвящены изучению свойств и характеристик магнитного поля, магнитных свойств вещества и тех магнитных явлений, которые находят широкое применение в практике решения многих научных и инженерных задач. Их цель – оказать помощь в самостоятельной работе студентам при подготовке к лабораторному практикуму.

В описании каждой работы выделены цели и задачи, изложена краткая теория работы (ее основное физическое содержание). Без усвоения теории данной работы, ее целей и задач нельзя приступать к ее выполнению. Внимательное ознакомление с описанием экспериментальной установки и порядком выполнения работы позволит студенту правильно выполнить работу, обработать результаты измерений и соответствующим образом оформить отчет.

1 Лабораторная работа ЭМК – 10. Исследование магнитных полей методом моделирования

Цель работы: ознакомление с одним из способов изучения характеристик магнитных (электрических) полей, основанном на математическом моделировании.

Задачи:

-моделирование магнитного поля заданной системы проводников с током;

-построение линий напряженности; приобретение навыков в использовании закона полного тока на примере определения индуктивности системы проводников.

1.1 Теоретическое введение

При решении многих практических задач (например, при конструировании электронных линз и других электронных приборов) требуется знание распределения электрического и магнитного полей в пространстве, заключенном между электродами произвольной формы. Теоретический расчет таких полей возможен только для самых простых их конфигураций, а, в общем случае, практически он невыполним. Поэтому сложные электрические и магнитные поля исследуются экспериментально, методом их математического моделирования, суть которого состоит в следующем.

Для математического моделирования электростатического поля используют тот факт, что электрическое поле стационарного тока в слабо проводящей однородной среде (электролит, проводящая бумага) является потенциальным. Это поле подобно электростатическому полю в диэлектрике при одинаковой конфигурации электродов. Если потенциалы электродов в обоих случаях одни и те же, то распределение потенциала в диэлектрике такое же, как в проводящей среде. Подобие полей видно из сопоставления следующих их свойств:

а) электростатическое поле в диэлектрике потенциально, циркуляция вектора напряженности электростатического поля по замкнутому контуру равна нулю:

$$\oint \vec{E} d\vec{l} = 0.$$

Плотность стационарного электрического тока \vec{j} внутри проводящей среды удовлетворяет уравнению непрерывности:

$$\oint \vec{j} d\vec{l} = 0.$$

В соответствии с законом Ома:

$$\vec{j} = \gamma \vec{E}_{\text{стат}},$$

где \vec{j} - плотность тока;

γ - удельная проводимость среды;

$\vec{E}_{\text{стат}}$ – напряженность стационарного электрического поля, получаем и для стационарного поля:

$$\oint \vec{E}_{\text{стат}} d\vec{l} = 0;$$

б) имеется подобие и между граничными условиями:

$$E_{\tau 1} = E_{\tau 2}; \quad \varepsilon_1 E_{n1} = \varepsilon_2 E_{n2}; \quad \gamma_1 E_{n1} = \gamma_2 E_{n2}.$$

Из сказанного следует, что проводящая среда с током может служить моделью для исследования электростатического поля, если проводимость среды γ заменить диэлектрической проницаемостью ε , а электроды в обоих случаях сделать подобными и подобным образом расположить.

Рассмотрим возможность моделирования магнитного поля постоянных токов. Метод математического моделирования полей имеет больше преимущества перед экспериментальным исследованием самих этих полей или их физических моделей. То обстоятельство, что внутри проводящей среды текут токи, делает возможным употребление токопроводящих вольтметров, гальванометров или соответствующих им приборов (схем), которые удобно и надежно позволяют определить потенциалы (разность потенциалов) в интересующих нас точках поля. Кроме того, распределение токов в проводящей среде нечувствительно к посторонним электростатическим (магнитным) влияниям. И, наконец, непосредственное экспериментальное определение характеристик полей (\vec{E} , \vec{H}) бывает либо слишком затруднительным, либо вообще невозможным.

Картину магнитного поля параллельных проводников с током I можно получить, взяв в качестве модели электростатическое поле этих проводников, заряженных с линейной плотностью заряда τ . Для простоты рассмотрим сначала поле одного такого проводника – бесконечно тонкой заряженной нити.

В системе отсчета K , относительно которой этот проводник (нить) неподвижен, существует электростатическое поле, характеризуемое векторами напряженности \vec{E} и электрического смещения \vec{D} , связь между которыми в случае изотропной среды выражается соотношением:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E}. \quad (1.1)$$

Из закона преобразования полей следует, что если в системе отсчета K имеется только электрическое поле, то в системе K' , движущейся относительно системы K со скоростью \vec{v} , появляется также и магнитное поле. Перейдем в систему отсчета K' (оси координат которой расположим параллельно осям координат системы K), движущуюся со скоростью \vec{v} вдоль оси x , совпадающей с нитью. Заряд нити τ в этом случае движется относительно системы K' со скоростью $-\vec{v}$ и представляет собой прямой ток $I = -\tau \vec{v}$. Этот ток создает (в системе K') магнитное поле, напряженность которого на расстоянии r от него определяется формулой:

$$H = \frac{I}{2\pi r} = -\frac{\tau v}{2\pi r}. \quad (1.2)$$

С другой стороны, в системе К есть электростатическое поле заряженной нити:

$$D = \frac{\tau}{2\pi r}. \quad (1.3)$$

Конфигурация обоих полей показана на рисунке 1.1.



а) линии индукции и эквипотенциальные поверхности электростатического поля заряженной нити;

б) линии напряженности магнитного поля тока.

Рисунок 1.1 - Аналогия электростатического и магнитного полей

Сравнивая (1.2) с (1.3) и принимая во внимание направление векторов \vec{D} , \vec{H} и \vec{v} , получим:

$$\vec{H} = [\vec{v}\vec{D}] = -\epsilon_0\epsilon [\vec{v}\vec{E}]. \quad (1.4)$$

Можно показать, что полученный результат (10.4) будет справедлив и для других конфигураций полей с осевой симметрией, в частности, для магнитного поля двухпроводной линии, исследуемого в данной работе.

Если точка наблюдения скользит по эквипотенциальной поверхности электрического поля параллельно проводникам, то вектор \vec{H} направлен по касательной к эквипотенциальной линии исходного электростатического поля (рисунок 10.2). В этом случае напряженность:

$$H = \epsilon\epsilon_0 v E = \epsilon\epsilon_0 v d\varphi / dr, \quad (1.5)$$

где φ - электрический потенциал исходного поля; производная $d\varphi/dr$ берется в направлении нормали к эквипотенциальной линии.

Это означает, что эквипотенциальные линии электростатического поля в неподвижной системе отсчета являются линиями напряженности магнитного поля в движущейся системе отсчета, т.е. электростатическое поле заряженных проводников может служить моделью магнитного поля тех же проводников с током.

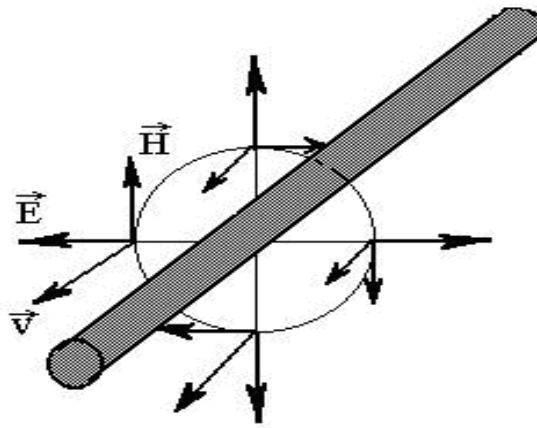


Рисунок 1.2

10.2 Методика работы и описание экспериментальной установки

Снимая карту эквипотенциалей электростатического поля, получают тем самым карту линий напряженности магнитного поля моделируемой системы токов, состоящей из двух параллельных проводов.

В качестве проводящей среды для модели используют проводящую бумагу. Моделируют плоские такие поля, потенциал и напряженность которых зависят лишь от двух координат.

Электрическая схема установки приведена на рисунке 1.3.

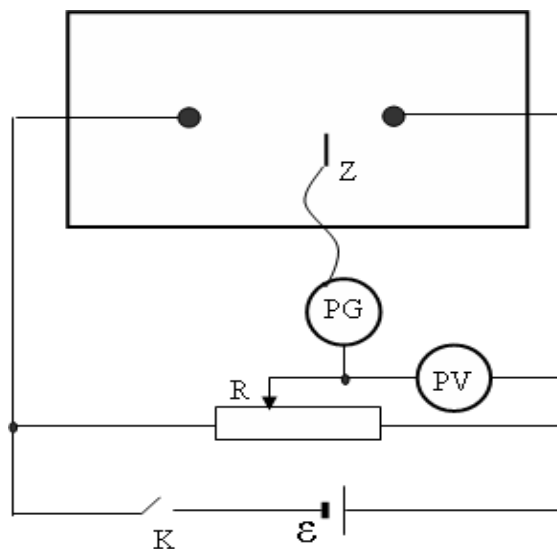


Рисунок 1.3

На электроды, закрепленные на проводящей бумаге подается постоянное стабилизированное напряжение от источника. Тогда на поверхности бумаги возникает электрическое стационарное поле. Потенциал в различных точках листа проводящей бумаги измеряют с помощью зонда Z , соединенного через гальванометр (микроамперметр) PG с подвижным контактом потенцио-

метра R (четыре участка цепи – два между движком потенциометра и его концевыми контактами и два между зондом и электродами на листе бумаги – образуют мост постоянного тока). Ток через микроамперметр равен нулю, когда зонд установлен в точку, потенциал которой совпадает с потенциалом движка потенциометра. Разность потенциалов между нижним контактом потенциометра и его движком измеряют вольтметром PV .

В результате измерений получают карту эквипотенциальных линий с заданным шагом $\Delta\varphi$.

Для вычисления напряженности магнитного поля следует воспользоваться законом полного тока, вычислив циркуляцию $\oint_l \vec{H} d\vec{l}$ по контуру l , представляющему собой замкнутую линию напряженности, охватывающую провод с током I . Вычисление приближенного значения циркуляции производится разбиением контура интегрирования (на карте поля для этого используется ближайшая к электроду замкнутая эквипотенциаль электрического поля) на участки Δl_i (рисунок 1.3 а).

Для построения линий напряженности (силовых линий) используют следующий прием (рисунок 1.3 а). Проводят линию, соединяющую электроды, так, чтобы она совпала с осью симметрии поля. Из точки O на поверхности электрода измеряют расстояние $O1$ до ближайшей эквипотенциали. Это расстояние откладывают вдоль поверхности электрода, получая, таким образом, точку $1'$ на электроде. Через точку $1'$ проводят отрезок $1'2'$ перпендикулярно поверхности электрода. Откладывают расстояние $1'2'$ вдоль поверхности электрода и т.д. Построение заканчивают, дойдя до оси симметрии. Аналогичное построение производят от точки O в другую сторону (каждое построение следует заканчивать таким образом, чтобы длина последнего до оси симметрии отрезка на поверхности электрода была больше длины предпоследнего). Разделив, таким образом, ближайшую к электроду эквипотенциаль, через полученные точки (1; 2; 3; ...; i) проводят перпендикулярные ей отрезки до пересечения со следующей эквипотенциалью. Когда все эквипотенциали карты окажутся разделенными, полученные точки следует соединить плавными кривыми, соблюдая их ортогональность эквипотенциальным линиям в точках пересечения. (Если поле имеет две оси симметрии, например поле двухпроводной линии, то построение силовых линий удобно проводить сразу от обоих электродов).

Напряженность поля H_i для каждого отрезка Δl_i можно определить из соотношения

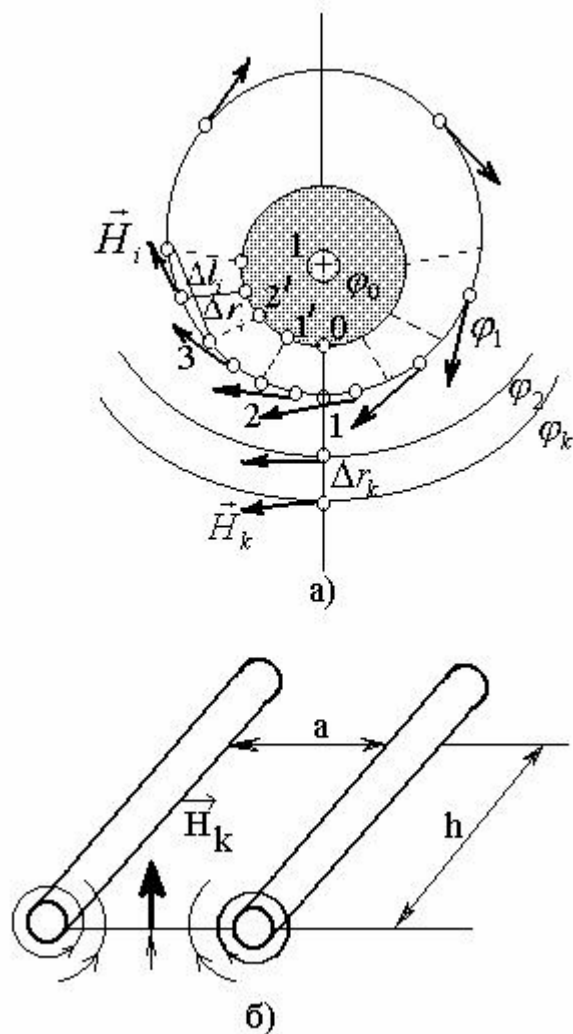


Рисунок 1.3

$$H_i = \varepsilon \varepsilon_0 v \frac{|\varphi_0 - \varphi_i|}{\Delta r_i}, \quad (1.6)$$

где Δr_i - расстояние между средними точками отрезков на линии напряженности и поверхности электрода;

φ_0 и φ_1 - потенциалы электрода и ближайшей к нему эквипотенциальной линии электростатического эквивалента модели.

В соответствии с законом полного тока циркуляция вектора напряженности магнитного поля:

$$\sum_i H_i \Delta l_i = \varepsilon \varepsilon_0 v (\varphi_0 - \varphi_1) \sum_i \frac{\Delta l_i}{\Delta r_i} = I. \quad (1.7)$$

Из (1.7) можно определить пересчетный множитель модели (величина, пропорциональная скорости движения системы отсчета), если задать значение тока I моделируемой системы равным 1 А, т.е.:

$$K = \varepsilon_0 \varepsilon v (\varphi_0 - \varphi_1) = \left(\sum_i \frac{\Delta l_i}{\Delta r_i} \right)^{-1}, \quad (1.8)$$

где Δr_i -расстояние между средними точками отрезков на поверхности электрода и на ближайшей эквипотенциали.

С помощью пересчетного множителя (1.8) определяют напряженность магнитного поля на каждом участке Δl_i выделенной линии напряженности:

$$H_i = KI / \Delta r_i . \quad (1.9)$$

Исследуемая модель позволяет найти индуктивность моделируемой системы проводников. Для этого следует воспользоваться определением индуктивности $L = \Phi / I$, где Φ –магнитный поток через площадь $S=ha$ (рисунок 1.3 б) между токонесущими проводниками. Магнитный поток:

$$\Phi = \int_S \mu_0 H dS = \mu_0 h \sum_k H_k \Delta r_k ,$$

где H_k –значения напряженностей магнитного поля в точках, лежащих на линии, соединяющей центры проводников;

Δr_k -расстояния между соответствующими линиями напряженности (рисунок 1.3 а).

Поскольку

$$H_k = K \frac{\Delta \varphi_k}{\varphi_0 - \varphi_1} \frac{I}{\Delta r_k} ,$$

для магнитного потока Φ получаем

$$\Phi = \mu_0 h K \frac{U}{\varphi_0 - \varphi_1} I ,$$

где U –разность потенциалов между электродами модели.

Вычислив магнитный поток, легко найти погонную индуктивность системы проводников

$$L_n = \frac{L}{h} = \mu_0 K \frac{U}{\varphi_0 - \varphi_1} . \quad (1.10)$$

Полученное значение индуктивности можно сравнить с теоретическим, которое для линии из двух параллельных проводов диаметром d с расстоянием между ними, а определяют как:

$$L_n = \frac{\mu_0}{4\pi} \ell n \frac{2a + d}{d} . \quad (1.11)$$

1.3 Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

1.3.1 Ознакомиться с измерительной установкой. Перенести в тетрадь с соблюдением масштаба пространственную сетку и форму электродов моделируемого поля.

1.3.2 Включить измерительную схему (рисунок 1.3).

1.3.3 Установить потенциал зонда относительно электрода 2 В. Поместить зонд вблизи соответствующего электрода на осевой линии поля и перемещая его вдоль этой линии, найти точку с заданным потенциалом. При этом

показания микроамперметра равны нулю. Перенести координаты точки в тетрадь. Затем, смещая зонд по поверхности поля влево или вправо (примерно на 2 см), отыскать следующую точку с таким же потенциалом. Аналогичным образом снять ещё несколько точек. Построить эквипотенциальную линию, соединив точки кривой, записать рядом с ней значение потенциала.

1.3.4 Меняя показания вольтметра PV каждый раз на 1 В, построить следующие эквипотенциальные линии.

1.3.5 Построить векторы напряженности H_i для первой эквипотенциали (линии напряженности магнитного поля), согласно описанию методики работы. Задав значение силы тока I равным 1 А и направление тока в проводах, указать их на изображениях сечений проводов. В соответствии с выбранным направлением тока указать стрелками направление линий напряженности.

1.3.6 Вычислить напряженности магнитного поля H_i для первой эквипотенциали и H_k для последующих, по (1.9), предварительно определив пересчетный множитель модели по (1.8).

1.3.7 Вычислить по (1.11) погонную индуктивность моделируемой линии. Сравнить полученное значение с теоретическим.

1.3.8 Обработать результаты измерений и сделать выводы.

1.4 Контрольные вопросы

1.4.1 Что лежит в основе метода моделирования магнитного поля?

1.4.2 Закон полного тока, его применение в данной работе.

1.4.3 Напряженность магнитного поля. Определение напряженности поля в данной работе.

2 Лабораторная работа ЭМК – 11. Измерение горизонтальной составляющей магнитной индукции Земли

Цель работы: овладение методом экспериментального определения горизонтальной составляющей магнитной индукции Земли.

Задача: определить горизонтальную составляющую магнитной индукции Земли.

2.1 Методика работы

Магнитное поле Земли подобно полю однородно намагниченного шара. Координаты магнитных полюсов: северного (в Южном полушарии) 78° южной широты и 111° восточной долготы и Южного (в Северном полушарии) 78° северной широты и 69° западной долготы, магнитная ось наклонена относительно географической на 11° и смещена на 1140 км в сторону Тихого океана. Магнитные полюсы и ось со временем изменяют свое положение. Линии магнитного поля выходят приблизительно из центра Земли через Южное по-

лушарие и, обогнув Землю, возвращаются к ее центру через Северное полушарие. Компоненты магнитного поля Земли на её поверхности меняются в следующих пределах: полный вектор индукции магнитного поля B_0 (в зависимости от широты) - от + 62 до - 73 мкТл, горизонтальная составляющая B_r - от 0 до 41 мкТл. Магнитное поле Земли претерпевает вековые вариации (в настоящее время поле уменьшается примерно на 1% за каждые 10 лет). В действительности поле Земли имеет более сложную конфигурацию, чем поле однородно намагниченного шара, т.к. добавляются поля магнитных аномалий, внеземные поля. Предполагается, что главным источником поля являются вихревые токи в жидком ядре Земли.

В рассматриваемом методе определения горизонтальной составляющей магнитного поля Земли применяется прибор, называемый тангенс-гальванометром. Тангенс-гальванометр состоит из нескольких вертикально расположенных круговых витков, в центре которых установлена магнитная стрелка.

Стрелка должна быть короткой, чтобы можно было принимать поле, действующее на полюса стрелки со стороны кругового тока, равным магнитной индукции в центре кругового тока.

Магнитная стрелка может вращаться вокруг вертикальной оси, поэтому на нее со стороны поля Земли действует лишь горизонтальная составляющая \vec{B}_r . В отсутствие тока магнитная стрелка располагается по направлению горизонтальной составляющей земного магнитного поля \vec{B}_r , т.е. лежит в плоскости магнитного меридиана (плоскости, проходящей через данную точку земной поверхности и магнитные полюсы Земли).

Если пропустить ток через витки, то в их центре магнитное поле витков B_1 будет перпендикулярно земному (рисунок 2.1).

Стрелка прибора располагается по равнодействующей обоих полей.

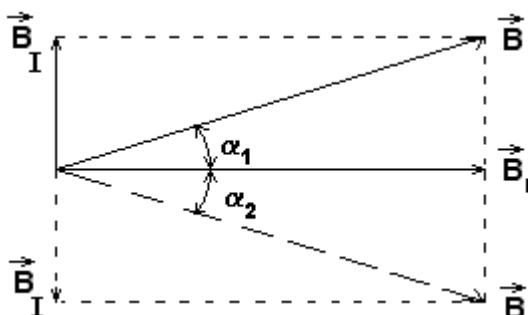


Рисунок 2.1

Из рисунка видно, что $B_1 = B_r \operatorname{tg} \alpha$. Магнитная индукция поля в центре витков согласно закону Био-Савара-Лапласа равна:

$$B_1 = \mu_0 \frac{I \cdot N}{2R},$$

где N - число витков;

R - радиус витка.

Таким образом, $B_r = \mu_0 \frac{IN}{2R \cdot \operatorname{tg} \alpha} = \mu_0 \frac{I \cdot N}{2R} \operatorname{ctg} \alpha$. Этой формулой пользуются для опытного определения B_r .

2.2 Описание экспериментальной установки

Электрическая схема установки для измерения горизонтальной составляющей магнитной индукции Земли приведена на рисунке 2.2. Число витков тангенс - гальванометра, включаемых в цепь, может меняться.

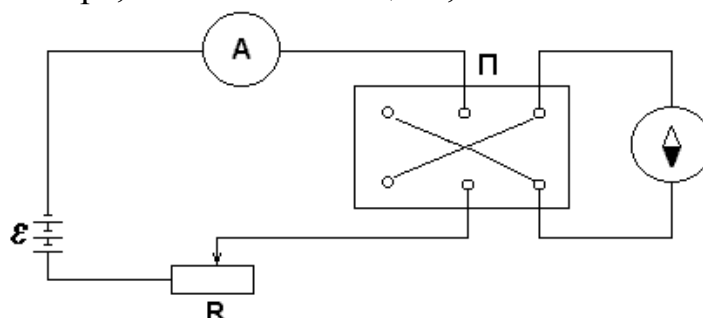


Рисунок 2.2

Для отсчета угла поворота магнитной стрелки тангенс-гальванометр снабжен шкалой. С помощью переключателя П можно изменять направление тока и, соответственно, направление магнитных полей \vec{B}_I и \vec{B} .

Миллиамперметр и реостат используются для измерения и регулирования тока.

2.3 Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

2.3.1 Установить плоскость катушки в плоскости магнитного меридиана.

2.3.2 Собрать и включить измерительную схему.

2.3.3 Установить ток и измерить угол поворота α_1 стрелки с помощью отсчетного устройства, затем изменить направление тока на противоположное с помощью переключателя П и снять отсчет угла α_2 по шкале. Отклонение стрелки при данном токе определяют как среднее арифметическое:

$$\alpha = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}.$$

Данные измерений занести в таблицу 2.1.

2.3.4 Действия п.2.3.3 выполнить 6 раз для двух значений N (числа витков).

2.3.5 По данным измерений вычислить B_r , $\langle B_r \rangle$ и доверительный интервал для $P=0,9$.

2.3.6 Сравнить полученный результат со значениями B_r Земли на различных широтах

Т а б л и ц а 2.1

N число вит	I, A	α_1	α_2	α	$tg\alpha$	$B_r,$ $мкТл$	$\langle B_r \rangle$

2.4 Контрольные вопросы

2.4.1 Что такое индукция магнитного поля? Каков её физический смысл?

2.4.2 От чего зависит индукция магнитного поля токов кругового тока?

2.4.3 Объясните принцип работы тангенс – гальванометра.

2.4.4 Как необходимо установить плоскость катушки? Почему?

2.4.5 На чем основана методика определения горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли?

2.4.6 Какова конфигурация магнитного поля Земли?

3 Лабораторная работа ЭМК-12. Изучение магнитного поля соленоида с помощью датчика Холла

Цель работы: освоение одного из методов измерения магнитной индукции.

Задачи:

- определить постоянную Холла и концентрацию носителей тока;
- определить индукцию магнитного поля на оси соленоида.

3.1 Методика работы

Соленоид представляет себя цилиндрический каркас, на который намотаны плотно прилегающие друг к другу витки провода. Одной из основных характеристик соленоида является величина n - число витков на единице его длины. На рисунке 3.1 изображено сечение соленоида. Как правило, витки провода наматываются в несколько слоев.

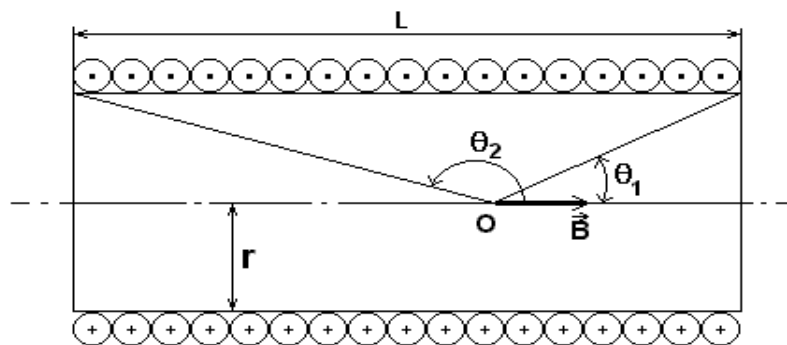


Рисунок 3.1

При пропускании тока I по виткам соленоида в нем возникает магнитное поле. На оси соленоида индукция \vec{B} в любой её точке O может быть определена по формуле:

$$B = \frac{1}{2} \mu_0 I n (\cos \theta_1 - \cos \theta_2), \quad (3.1)$$

где θ_1 и θ_2 - углы, образуемые с осью соленоида лучами, проведенными от исследуемой точки O в начало и конец витков соленоида.

Для бесконечно длинного соленоида (на практике, когда $L \gg r$) $\theta_1 = 0$, $\theta_2 = \pi$, и формула (3.1) упрощается:

$$B = \mu_0 I n. \quad (3.2)$$

В настоящей работе для экспериментального исследования магнитного поля соленоида используется метод, основанный на эффекте Холла. Если через проводящую пластинку поперечным сечением bh_g пропустить ток плотностью \vec{j} и поместить её в поперечное магнитное поле с индукцией \vec{B} , то перпендикулярно векторам \vec{j} и \vec{B} создается электрическое поле напряженностью \vec{E} (рисунок 3.2).

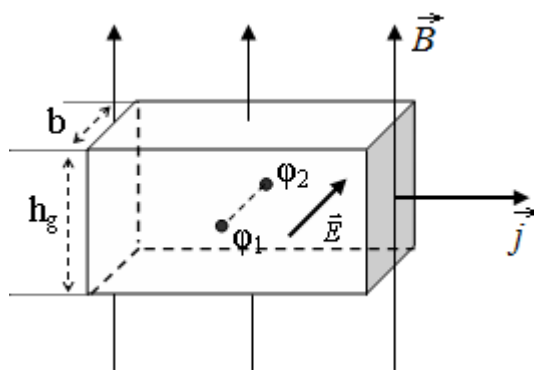


Рисунок 3.2

Возникающая при этом разность потенциалов $\Delta\varphi_x$ (ЭДС Холла) прямо пропорциональна плотности тока, магнитной индукции и ширине пластинки b :

$$\Delta\varphi_x = R j B b. \quad (3.3)$$

Заменив в этом выражении плотность тока j через силу тока I_g , протекающего через датчик и площадь сечения датчика bh_g (h_g - толщина датчика), получим:

$$\Delta\varphi_x = R \frac{I_g B}{h_g}. \quad (3.4)$$

Коэффициент пропорциональности R , равный:

$$R = \frac{1}{ne}, \quad (3.5)$$

где n - концентрация носителей тока;

e - элементарный заряд, называется постоянной Холла.

3.2 Описание экспериментальной установки

В данной работе используется полупроводниковый датчик Холла марки Х501 с управляющим током $I_g = 90$ мА.

Датчик Холла располагается на торце специального штока, вставляемого в соленоид. Толщина датчика h_g в направлении магнитного поля равна 0,2 мм.

Для определения положения датчика внутри соленоида на боковой грани штока нанесена шкала.

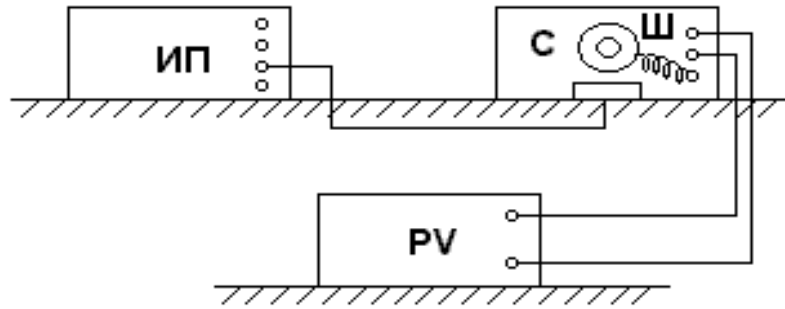


Рисунок 3.3

Блок-схема установки изображена на рисунке 3.3. Она содержит в себе: источник питания (ИП), цифровой вольтметр (PV), соленоид (С), шток (Ш) с нанесенной шкалой и закрепленным на его конце датчиком Холла.

3.3 Порядок выполнения работы

3.3.1 Градуировка датчика Холла и определение концентрации носителей тока:

- поставить шток в среднее положение («О» по шкале);
- включить источник питания и цифровой вольтметр в сеть 220В. Измерить ЭДС Холла в центре соленоида для токов $I_c = 0.5$ А ; 1А; 1,5 А; 2 А Данные занести в таблицу 3.1;
- по формуле (3.2) вычислить индукцию магнитного поля для данных значений силы тока. Данные занести в таблицу;
- для каждого измерения по формуле (3.4) вычислить постоянную Холла R и определить ее среднее значение $\langle R \rangle$;
- по среднему значению $\langle R \rangle$, пользуясь формулой (3.5), определить концентрацию n носителей тока в датчике Холла.

Т а б л и ц а 3.1

I_c, A	$\Delta\varphi, B$	$B, Tл$	$R, м^3 \cdot Кл^{-1}$	$\langle R \rangle, м^3 \cdot Кл^{-1}$	$n, м^{-3}$

3.3.2 Исследование зависимости магнитной индукции от координаты z в интервале $(-100 \div 100)$:

- установить величину тока в соленоиде по указанию преподавателя;
- перемещая шток с датчиком Холла вдоль оси соленоида с интервалом $\Delta z = 1 \text{ см}$, измерить ЭДС Холла. Полученные данные занести в таблицу 3.2;
- по формуле (3.4), используя среднее значение $\langle R \rangle$, вычислить индукцию магнитного поля для каждого положения датчика Холла. Полученные данные занести в таблицу 3.2;
- по данным таблицы 3.2 построить график зависимости $B = f(z)$;
- сделать анализ результатов и сформулировать выводы, сравнив полученную зависимость $B(r)$ с теоретической.

Т а б л и ц а 3.2

$z, \text{ мм}$	100	90	80	*	*
$\Delta \varphi, \text{ В}$					
$B, \text{ Тл}$					

3.4 Контрольные вопросы

3.4.1 Вектор магнитной индукции как основная характеристика магнитного поля.

3.4.2 Как зависит индукция магнитного поля соленоида от координаты точки вдоль его оси?

3.4.3 Какой вид имеет выражение, определяющее магнитную индукцию бесконечно длинного соленоида?

3.4.4 В чем состоит эффект Холла?

3.4.5 Что такое датчик Холла? Как он используется в данной работе для исследования магнитного поля соленоида?

4 Лабораторная работа ЭМК – 13. Определение магнитных характеристик ферромагнетиков и петли гистерезиса в переменных магнитных полях

Цель работы: изучение процессов намагничивания и перемагничивания ферромагнетиков в переменном магнитном поле.

Задачи:

-получить основную кривую намагничивания $B = B(H)$ и зависимость магнитной проницаемости от напряженности поля $\mu = \mu(H)$;

-определить основные магнитные характеристики данного образца ферромагнетика.

4.1 Методика работы

По своим магнитным свойствам ферромагнетики относятся к сильно-магнитным веществам. Для них зависимость индукции поля \vec{B} (или намагниченности \vec{j} от напряженности поля \vec{H}) носит сложный характер (петля магнитного гистерезиса).

Остаточная индукция B_r (или остаточная намагниченность J_r) и коэрцитивная сила H_c , начальная μ_0 и максимальная μ_{\max} магнитные проницаемости являются основными характеристиками материала ферромагнетика и зависят от его химического состава и внутреннего строения.

При циклическом перемагничивании ферромагнитного образца, вследствие необратимого характера процессов перемагничивания, возникают потери энергии магнитного поля, так называемые потери гистерезиса. Энергия, затрачиваемая на перемагничивание ферромагнетика, переходит в тепло - образец нагревается. Это нагревание является дополнительным к нагреванию, вызванному вихревыми токами. Величина потерь гистерезиса пропорциональна площади петли гистерезиса и при расчете за один цикл перемагничивания определяется интегралом:

$$Q = \oint \vec{H} d\vec{B}. \quad (4.1)$$

Снятие кривой намагничения и петли гистерезиса ферромагнетика осуществляется в данной работе при помощи осциллографа. Для этого исследуемый ферромагнетик помещается в магнитное поле, создаваемое переменным током. Принципиальная схема установки для наблюдения петли гистерезиса приведена на рисунке 4.1. В качестве исследуемого образца используется ферритовый тороид Т.

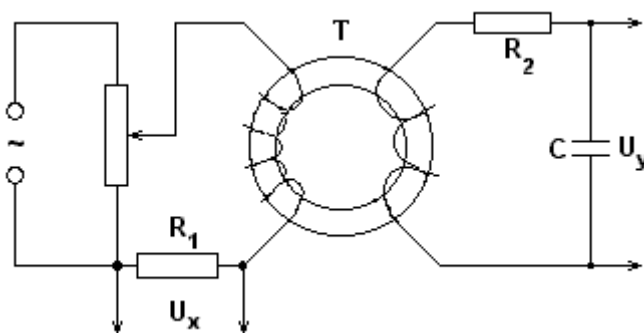


Рисунок 4.1

Если первичная обмотка тороида питается через сопротивление R_1 переменным током I_1 , то величина напряженности магнитного поля определяется по формуле:

$$H = n_1 I_1, \quad (4.2)$$

где n_1 - линейная плотность витков (число витков первичной обмотки на единицу длины).

Тогда напряжение на горизонтально отклоняющих пластинах осциллографа пропорционально напряженности поля H (рисунок 4.1):

$$U_x = I_1 R_1 \frac{H}{n_1} \cdot R_1 \quad \text{или} \quad H = \frac{n_1}{R_1} U_x = k_1 U_x, \quad (4.3)$$

где
$$k_1 = \frac{n_1}{R_1} = \frac{N_1}{R_1 \cdot 2\pi r_T}$$

(r_T - средний радиус тороида).

Во второй обмотке тороида возбуждается ЭДС индукции, равная:

$$\varepsilon_i = -d\psi / dt.$$

Поскольку потокосцепление

$$\psi = BN_2 S$$

где S - сечение;

N_2 - число витков вторичной обмотки, то

$$|\varepsilon_i| = N_2 S \frac{dB}{dt} \quad \text{и} \quad \frac{dB}{dt} = \frac{|\varepsilon_i|}{N_2 S}. \quad (4.4)$$

Для того, чтобы подать на вертикально отклоняющие пластины осциллографа напряжение U_y , пропорциональное B , необходимо между вторичной обмоткой и осциллографом включить интегрирующее звено ($R_2 C$ ячейка на рисунке 4.1). Действительно, из (4.4) следует, что:

$$B = \frac{1}{N_2 S} \int |\varepsilon_i| dt.$$

ЭДС индукции определяется из закона Ома для переменного тока:

$$\varepsilon_i = I_2 \sqrt{R_2^2 + (\omega L_2 - \frac{1}{\omega C})^2}. \quad (4.5)$$

В формуле (4.5) учтено, что число витков вторичной обмотки невелико, поэтому можно пренебречь ЭДС самоиндукции во вторичной обмотке.

Активное сопротивление R_2 и емкость C подбираются такими, чтобы индуктивное и емкостное сопротивления были пренебрежимо малы по сравнению с активным. Тогда можно принять $\varepsilon_i = I_2 R_2$ и, следовательно, получаем:

$$B = \frac{R_2}{N_2 S} \int I_2 dt. \quad (4.6)$$

Так как $\int I_2 dt$ есть величина заряда на обкладках конденсатора q , который равен $q = CU_y$, то из формулы (4.6) получаем следующее соотношение между U_y и B :

$$B = \frac{R_2 C}{N_2 S} U_y = k_2 U_y, \quad (4.7)$$

где $k_2 = R_2 C / (N_2 S)$.

Таким образом, напряжение на конденсаторе C , подаваемое на вход y осциллографа, пропорционально индукции магнитного поля B в ферромагнитном сердечнике.

При подаче напряжения U_x на горизонтально отклоняющие пластины и U_y - на вертикально отклоняющие пластины происходит сложение взаимно перпендикулярных колебаний электронного луча относительно положения равновесия - центра экрана. В результате за полный период колебаний луч воспроизведет на экране осциллографа в некотором масштабе петлю гистерезиса, как это следует из уравнений (4.2) и (4.7). Полученная петля гистерезиса может служить основой для изучения магнитных характеристик исследуемого ферромагнетика.

4.2 Описание экспериментальной установки

Для получения петли гистерезиса в переменном магнитном поле используется установка ФПЭ - 07, принципиальная схема которой изображена на рисунке 4.2.

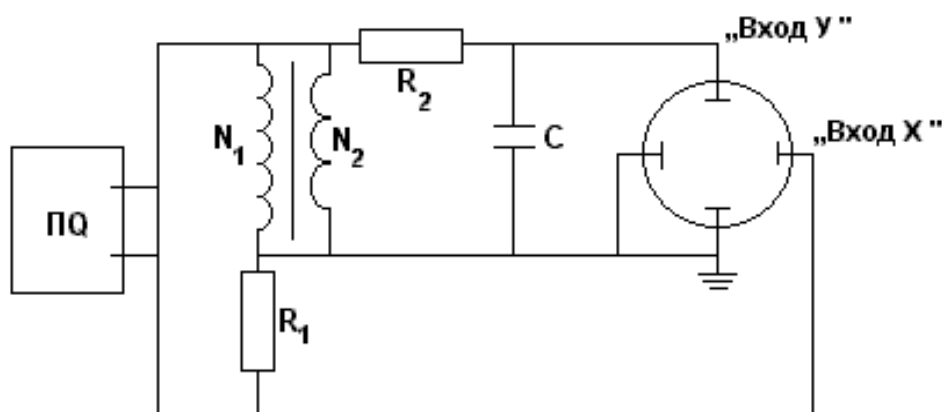


Рисунок 4.2

В качестве исследуемого ферромагнетика используется ферритовый тороид Т. Первичная обмотка тороида питается переменным током от генератора звуковой частоты ПQ и имеет число витков $N_1=200$.

Сопротивление $R_1 = 100$ Ом. Вторичная обмотка имеет $N_2=50$ витков, сопротивление $R_2 = 24$ кОм, емкость конденсатора $C=0,047$ мкФ. Средний радиус тороида $r_T=11,5$ мм, площадь сечения тороида $72 \cdot 10^{-6}$ м².

4.3 Порядок выполнения работы и обработка результатов измерения

4.3.1 Собрать схему рисунка 4.2. Включить осциллограф и блок ПQ в сеть и дать им прогреться в течение 5÷7 минут. Установить частоту колебаний 2 кГц, горизонтальную развертку осциллографа отключить.

4.3.2 Регулируя величину выходного напряжения на генераторе звуковых колебаний, установить в намагничивающей обмотке ток, необходимый для насыщения ферромагнетика. В этом же режиме с помощью ручек «усиление» на осциллографе добиться того, чтобы петля гистерезиса имела правильную форму и занимала всю площадь экрана (эти операции выполняются под руководством лаборанта или преподавателя).

4.3.3 Переснять предельную петлю гистерезиса с экрана осциллографа на миллиметровую бумагу (или в тетрадь). Отложить по осям величину цены деления сетки экрана осциллографа.

4.3.4 Уменьшая величину выходного напряжения генератора звуковых колебаний, получить семейство петель гистерезиса (не менее 5 частных циклов).

Для каждой петли определить координаты x_i и y_i ее вершин, найти их средние значения: $\langle x_i \rangle = \frac{|+x_i| + |-x_i|}{2}$; $\langle y_i \rangle = \frac{|+y_i| + |-y_i|}{2}$.

Все данные занести в таблицу 4.1.

4.3.5 По значениям величин $N_1, R_1, r_T, R_2, C, N_2, S$ рассчитать коэффициенты k_1 и k_2 .

4.3.6 По формулам (4.3) и (4.7) вычислить H_i и B_i для всех опытов и результаты вычислений занести в таблицу 4.1. При вычислении H_i и B_i следует иметь в виду, что отклонение электронного луча x_i, y_i определяется соответствующими напряжениями U_x и U_y и коэффициентами усиления каналов «X» и «Y» осциллографа:

$$U_x = k_x \cdot x, U_y = k_y \cdot y.$$

Значения коэффициентов k_x и k_y указаны на стенде лабораторной работы.

4.3.7 Рассчитать магнитную проницаемость μ исследуемого вещества (используя формулу $B = \mu_0 \mu H$) для всех полученных значений H_i, B_i . Данные расчетов занести в таблицу 4.1.

Т а б л и ц а 4.1

Номер опыта	$ +x_i $	$ -x_i $	$\langle x_i \rangle$ дел.шк.	$H_i, \frac{A}{m}$	$ +y_i $	$ -y_i $	$\langle y_i \rangle$, дел.шк.	$B_i, Тл$	μ_i
1									
2									
...									

3.8 На одном графике построить основную кривую намагничивания $B=B(H)$ и зависимость магнитной проницаемости от напряженности поля $\mu=\mu(H)$. По графику кривой $\mu=\mu(H)$ определить максимальное значение магнитной проницаемости ферромагнетика.

4.3.9 Воспользовавшись переснятой на миллиметровую бумагу предельной петлей гистерезиса, найти среднее значение координат точек H_c и B_r в делениях сетки осциллографа: $\langle x_c \rangle = \frac{|+x_c| + |-x_c|}{2}$ и $\langle y_r \rangle = \frac{|+y_r| + |-y_r|}{2}$.

Вычислить коэрцитивную силу H_c и остаточную индукцию B_r исследуемого образца ферромагнетика (аналогично п. 4.3.6). Все данные занести в таблицу 4.2.

Т а б л и ц а 4.2

$ +x_c $	$ -x_c $	$\langle x_c \rangle$	$ +y_r $	$ -y_r $	$\langle y_r \rangle$	$H_c, \frac{A}{м}$	$Br, Tл$	$S_{пред}, дел^2$	$Q, Дж$

4.3.10 Оценить потери гистерезиса за один цикл перемагничивания по площади S предельной петли гистерезиса с учетом формулы (4.1)

$$Q = k_1 k_x k_2 k_y S_{пред.}$$

Результаты занести в таблицу 4.2.

4.3.11 Дать оценку полученным результатам (сравнить их со справочными данными).

4.3.12 На основе полученных результатов сделать выводы об основных свойствах исследуемого ферромагнетика.

4.4 Контрольные вопросы

4.4.1 Каков механизм намагничения ферромагнетиков? Каков физический смысл намагниченности \bar{J} ?

4.4.2 В чем заключаются основные особенности ферромагнетиков?

4.4.3 Как можно наблюдать магнитный гистерезис на экране осциллографа? В чем заключается принцип работы экспериментальной установки?

4.4.4 Как определяются в данной работе основные характеристики ферромагнитного материала? Что это за величины?

4.4.5 Какие ферромагнетики являются магнитомягкими? магнитожесткими? Где их применяют?

5 Лабораторная работа ЭМК – 14. Изучение магнитных свойств железа

Цель работы: изучение свойств ферромагнетиков.

Задачи:

- снять основную кривую намагничения и петлю гистерезиса;
- определить магнитную проницаемость железа по основной кривой намагничения;
- построить график зависимости μ от H .

5.1 Методика работы

Железо-типичный представитель ферромагнетиков. Отличительными признаками ферромагнетиков являются наличие большой величины магнит-

ной проницаемости и восприимчивости, а также нелинейной зависимости индукции B и намагненности J от напряженности магнитного поля H .

Кривая намагнения ферромагнетика приведена на рисунке 5.1.

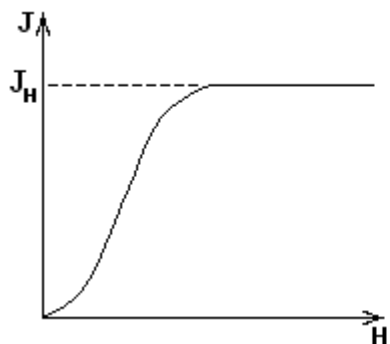


Рисунок 5.1

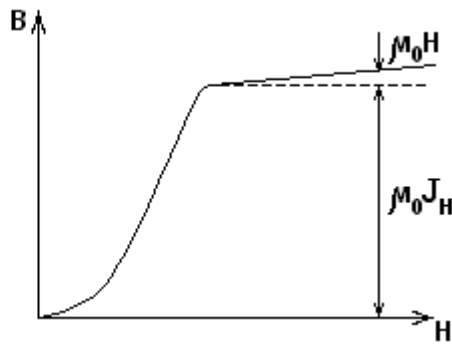


Рисунок 5.2

Если образец вначале был полностью размагничен, то, при росте напряженности магнитного поля от нуля, намагненность растет вначале быстро, затем медленнее и, наконец, достигается так называемое состояние насыщения, при котором дальнейший рост напряженности поля практически уже не вызывает увеличения намагненности.

Графики зависимостей $J(H)$ и $B(H)$ (рисунки 5.1, 5.2) отличаются, так как $\vec{B} = \mu_0 H + \mu_0 \vec{J}$. Поэтому при достижении намагненности насыщения J_H индукция продолжает увеличиваться за счет роста напряженности поля H .

Важной характеристикой ферромагнетиков является зависимость магнитной проницаемости:

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H} \quad (5.1)$$

от напряженности поля H (рисунок 5.3).

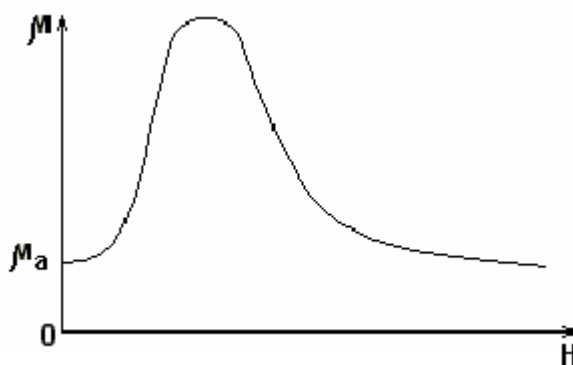


Рисунок 5.3

Эта кривая имеет максимум (максимальная проницаемость). Начинается кривая не с нуля, а от некоторой величины μ_a , называемой начальной проницаемостью.

В настоящей работе напряженность магнитного поля в железном сердечнике меняется при помощи изменения силы тока в витках проводника, намотанного на этот сердечник. Если сердечник полностью размагничен, то,

увеличивая ток от нуля, можно снять зависимость B от H , которая называется основной кривой намагничивания OB_1 (рисунок 5.4).

Достигнув некоторого значения индукции B_1 , начнем уменьшать ток в намагничивающей обмотке. Тогда изменение индукции будет описываться кривой B_1B_r , лежащей выше кривой намагничивания OB_1 .

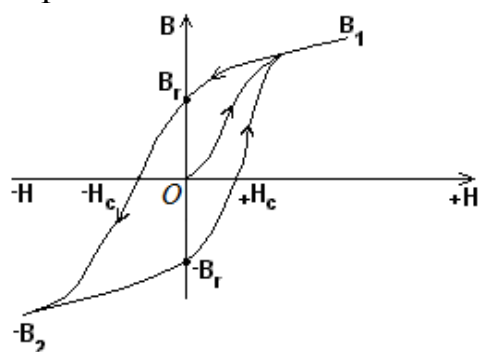


Рисунок 5.4

Происходит отставание изменения магнитной индукции B от изменения напряженности H . Это явление называется магнитным гистерезисом. Благодаря гистерезису, индукция B при данном значении напряженности поля H может иметь много различных значений в зависимости от того, как устанавливалась напряженность. Из-за гистерезиса магнитная индукция после выключения намагничивающего поля не становится равной нулю, а сохраняет некоторое значение B_r , называемое остаточной индукцией.

Для размагничивания ферромагнетика нужно создать магнитное поле противоположного направления. Если это поле ($-H$) увеличивать от нуля, то изменение индукции выразится кривой $B_r - H_c - B_2$. Напряженность поля $-H_c$, при которой индукция B становится равной нулю, называется коэрцитивной силой. При достаточной величине напряженности поля ($-H$) ферромагнетик намагничивается до насыщения, но направление намагниченности теперь противоположно тому, которое было при намагничивании в поле $+H$. Если индукция B_2 равна по абсолютной величине B_1 , то при уменьшении отрицательного поля до нуля и дальнейшем его возрастании до положительных значений, изменение индукции будет изображаться восходящей ветвью петли гистерезиса $-B_2 - B_r B_1$, совершенно аналогичной нисходящей ветви $B_1 B_r - B_2$. Если изменение индукции происходит от насыщения в одном направлении до насыщения в другом направлении, то петля гистерезиса называется максимальной. Если изменение индукции происходит не между значениями индукции насыщения, а между меньшими ее значениями, то получается так называемая частная петля, лежащая внутри максимальной. Очевидно, что истинное значение коэрцитивной силы H_c и остаточной индукции B_r можно получить только на максимальной петле гистерезиса.

5.2 Описание экспериментальной установки

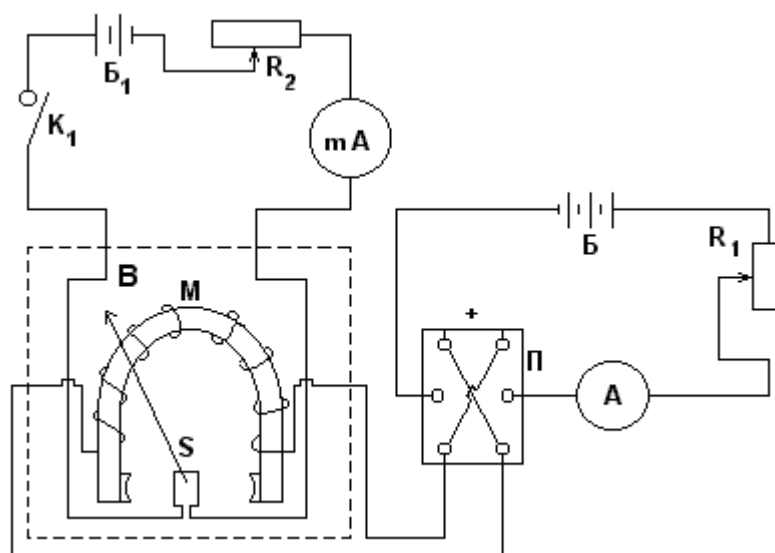


Рисунок 5.5

Схема установки для снятия петли гистерезиса представлена на рисунке 5.5. Пунктиром на схеме выделен прибор, с помощью которого измеряется индукция B поля, создаваемого в ферромагнитном сердечнике электромагнита M . Обмотка электромагнита имеет определенное число витков N и питается от источника B .

Между полюсами электромагнита находится легкая подвижная рамка S с обмоткой, при пропускании тока I через обмотку электромагнита, сердечник намагничивается и между его полюсами возникает магнитное поле. Если в рамке S течет постоянный ток I_0 , то на нее будет действовать вращающий момент, пропорциональный индукции магнитного поля B , создаваемого ферромагнитным сердечником, и стрелка отклонится на определенный угол. Шкала прибора проградуирована в единицах магнитной индукции $Tл$ при строго определенном токе I_0 в рамке S .

Напряженность H магнитного поля в сердечнике определяется формулой:

$$H = n I, \quad (5.2)$$

где n - плотность витков обмотки (указана на приборе);

I – сила тока в обмотке M .

Ток I , и, следовательно, напряженность H можно менять с помощью реостата R_1 . Переключателем Π осуществляются изменения направления тока. Прибор PA служит для измерения силы тока I , прибор mA – для измерения тока в рамке S .

5.3 Порядок выполнения работы и обработка результатов эксперимента

5.3.1 Собрать цепь по схеме рисунка 5.5, внимательно ознакомившись с электрической цепью, назначением всех приборов.

5.3.2 Замкнуть ключ K_1 и реостатом R_2 установить определенную силу тока в рамке (величина тока, при котором градуировались шкала прибора, указана на приборе).

5.3.3 Если стрелка прибора B отклонилась от 0, значит в сердечнике электромагнита имеется остаточное намагничение. Следует размагнитить сердечник. Для этого необходимо по обмотке электромагнита пропустить несколько раз ток в противоположных направлениях, постепенно уменьшая его до нуля. При размагниченном сердечнике и наличии тока в рамке S стрелка прибора B должна установиться на нуле.

5.3.4 Установить реостат R_1 на максимальное сопротивление и замкнуть переключатель Π в положение “+”. Постепенно (с интервалом 0,1 А) увеличивая (с помощью реостата R_1) силу тока, снять зависимость B от I .

5.3.5 Получив максимальное значение B (допустимое по шкале прибора), начать постепенно уменьшать I , продолжая снимать зависимость B от I . Разомкнуть ключ Π и записать B для $I=0$.

5.3.6 Переключив ключ Π на противоположные клеммы (тем самым изменив направление тока в электромагните), продолжают снимать зависимость B от I , т.е., вначале увеличивают при помощи реостата ток, а затем, при достижении максимального значения B , уменьшают. После достижения минимального тока размыкают ключ Π и записывают значение B для $I=0$.

5.3.7 Переключить ключ Π в первоначальное положение (п.5.3.4) и увеличивать ток до достижения максимального B .

5.3.8 По формуле (14.2) вычислить значения H для каждого значения силы тока I в обмотке.

5.3.9 Построить график зависимости B от H , получив замкнутую петлю гистерезиса.

5.3.10 По точкам основной кривой намагничения (п.5.3.4) с помощью формулы (5.1) вычислить магнитную проницаемость μ железа и построить график зависимости μ от H .

5.3.11 Данные измерений и вычислений занести в таблицу 5.1.

5.3.12 На основе полученных результатов сделать выводы об основных свойствах исследуемого ферромагнетика.

Т а б л и ц а 5.1

I, A	$B, Tл$	$H, A/м$	μ

5.4 Контрольные вопросы

5.4.1 Виды магнетиков, их характеристики и свойства.

5.4.2 В чем состоит явление магнитного гистерезиса? Петля гистерезиса и ее основные параметры.

5.4.3 Как зависит магнитная проницаемость железа от напряженности магнитного поля? Почему можно вычислять ее лишь по точкам основной кривой намагничивания?

5.4.4 Принцип работы экспериментальной установки.

6 Лабораторная работа ЭМК – 15. Определение удельного заряда электрона методом магнетрона

Цель работы: изучение движения частиц во взаимно перпендикулярных электрическом и магнитном полях.

Задачи:

- ознакомиться с методом магнетрона;
- определить удельный заряд электрона.

6.1 Методика работы

Используемый метод определения e/m получил название метода магнетрона. Происхождение названия связано с электровакуумным прибором - магнетроном, служащим для генерации электромагнитных волн СВЧ - диапазона. Используемая в данном методе и в магнетроне конфигурация магнитного и электрического полей одинаковы.

Электроны, испускаемые нагретым катодом вакуумного диода, движутся в кольцевом пространстве, заключенном между катодом и анодом (коаксиальными цилиндрическими электродами). Благодаря такой форме и расположению электродов, электрическое поле \vec{E} в межэлектродном промежутке направлено по радиусу от анода к катоду. Сам диод помещен внутрь соленоида так, что магнитное поле соленоида \vec{B} направлено параллельно оси катода, т.е. перпендикулярно к электрическому полю. Электрическое поле ускоряет электроны в пространстве между электродами, а магнитное поле искривляет их траекторию.

Рассмотрим траекторию электронов, движущихся под действием рассматриваемой комбинации электрического и магнитного полей. Будем считать, что начальная скорость вылетевшего из катода электрона равняется нулю, т.е. не будем учитывать тепловую скорость электронов. Тогда очевидно, что при заданной ориентации электрического и магнитного полей движение электрона будет происходить в плоскости, перпендикулярной к оси электродов. Для расчетов воспользуемся полярной системой координат, т.е. будем характеризовать положение электрона расстоянием от оси катода \vec{r} и полярным углом φ (рисунок 6.1).

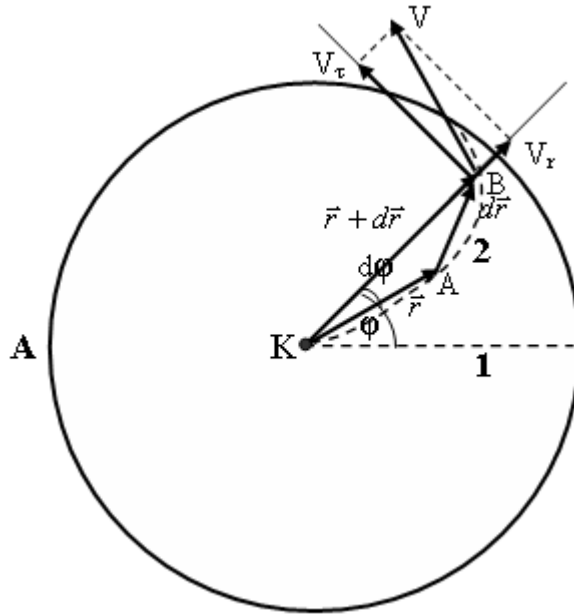


Рисунок 6.1

Движение электрона в плоскости (r, φ) из точки А в точку В удобно описать, если воспользоваться уравнением моментов:

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = [\vec{r}, q\vec{E}] + [\vec{r}, q[\vec{v}\vec{B}]], \quad (6.1)$$

где $q = -e$ – заряд электрона.

Спроектируем уравнение (6.1) на ось z , направленную вдоль оси катода. Имеем:

$$\frac{d(mr^2\dot{\varphi})}{dt} = eBr\dot{r}. \quad (6.2)$$

При нахождении проекции отдельных слагаемых уравнения (6.1) на ось z было принято во внимание, что $L_z = J_z\omega$, где J_z – момент инерции электрона относительно оси z , составляющий $J_z = mr^2$, откуда $L_z = mr^2\dot{\varphi}$. Очевидно, что $[\vec{r}, q\vec{E}]_z = 0$. Проекция второго слагаемого $[\vec{r}, q[\vec{v}\vec{B}]]_z = eBr\dot{r}$. Проинтегрируем уравнение (6.2) во времени:

$$mr^2\dot{\varphi} + C = \frac{1}{2}eBr^2. \quad (6.3)$$

Постоянная интегрирования C может быть найдена из начальных условий. Радиус катода r_k – величина малая, поэтому в начале движения электрона r тоже мало, малы и скорости электронов v , следовательно, и величина $\dot{\varphi}$. Это позволяет в начальный момент времени движения положить $r = 0$. Тогда константа интегрирования в уравнении (6.3) будет равна нулю. При этом получаем:

$$\omega = \dot{\varphi} = \frac{eB}{2m}. \quad (6.4)$$

Таким образом, угловая скорость вращения электронов линейно зависит от B и при данной индукции магнитного является величиной постоянной.

Наличие угловой скорости вращения у электронов свидетельствует об искривлении их траекторий магнитным полем. Примерный вид траекторий электронов показан на рисунке 6.2.

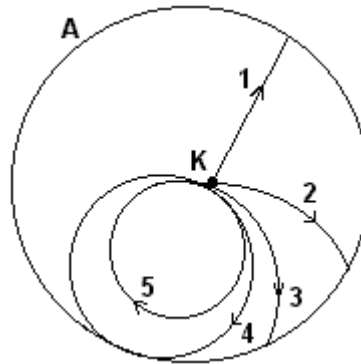


Рисунок 6.2

Траектория электронов, в общем случае, представляет собой кривую с переменной кривизной, уменьшающейся при приближении к аноду. Чем сильнее магнитное поле, тем больше искривление траектории электронов. При $B = 0$ траектория представляет прямую линию (1 на рисунке 6.2). При слабом поле траектория несколько искривляется, но электрон все же достигает анода (кривые 2, 3). При некотором критическом значении индукции магнитного поля $B_{кр}$ траектория искривляется так сильно, что в своей самой удаленной от катода точке только касается анода (кривая 4). И, наконец, при $B > B_{кр}$ электрон совсем не попадает на анод и возвращается к катоду (кривая 5). Ток диода при $B = B_{кр}$ начинает резко уменьшаться.

Индукцию критического поля $B_{кр}$ можно найти, если принять во внимание, что при $B = B_{кр}$ радиальная составляющая скорости электрона \dot{r} в точке $r = r_a$ (r_a - радиус анода) обращается в нуль. В этой точке есть только тангенциальная составляющая скорости:

$$V_\tau = V = r_a \omega. \quad (6.5)$$

Магнитное поле работы над электроном не совершает, поэтому работа электрического поля по перемещению электрона от катода к аноду равна приращению кинетической энергии электрона при этом перемещении:

$$eU = \frac{mv^2}{2}, \quad (6.6)$$

где U – разность потенциалов между катодом и анодом.

Начальной скоростью вылетающих из катода электронов пренебрегаем. Подставляя в формулу (6.6) значения v и ω из формул (6.4) и (6.5), получим:

$$U = \frac{1}{8} r_a^2 B_{кр}^2 \frac{e}{m}. \quad (6.7)$$

Отсюда

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{B_{кр}^2 \cdot r_a^2}. \quad (6.8)$$

Индукция магнитного поля соленоида длина L которого соизмерима с диаметром D , находится по формуле:

$$B_{\text{кр}} = \mu_0 n I_{\text{кр}} \frac{L}{\sqrt{L^2 + D^2}} = \frac{\mu_0 N I_{\text{кр}}}{\sqrt{L^2 + D^2}}, \quad (6.9)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ - магнитная постоянная;

N - число витков соленоида.

6.2 Описание экспериментальной установки

Принципиальная электрическая схема установки показана на рисунках 6.3 и 6.4

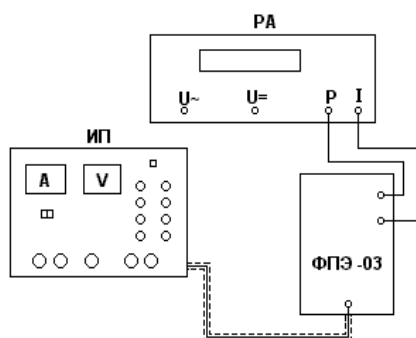


Рисунок 6.3

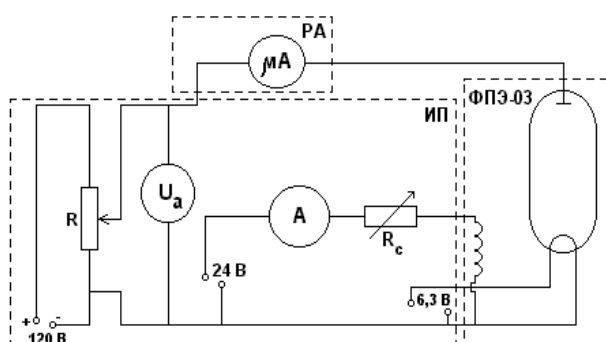


Рисунок 6.4

В состав кассеты ФПЭ - 03 входят диод и соленоид, питание установки осуществляется от источника питания ИП. Нить накала диода питается от выхода 6,3 В, обмотка соленоида - от выхода 24 В, анодная цепь - от выхода 120 В, напряжение которого можно плавно регулировать потенциометром R . Анодный ток определяется по прибору РА, ток в соленоиде - по показаниям амперметра ИП, анодное напряжение - по вольтметру ИП.

6.3 Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

6.3.1 Собрать электрическую схему (рисунки 6.3 и 6.4), для чего соединить гнезда на лицевой панели кассеты ФПЭ - 03 с соответствующими гнездами источника питания ИП и измерительного прибора РА.

6.3.2 Установить анодное напряжение $U_a = 40 \text{ В}$ по вольтметру ИП.

6.3.3 Изменяя ток в соленоиде от начального минимального значения до максимального через 0,1 А при постоянном анодном напряжении, снять сбросовую характеристику (зависимость анодного тока I_a от тока в соленоиде I_c), данные занести в таблицу 6.1.

6.3.4 Повторить п. 6.3.2 и 6.3.3 при двух других значениях анодного напряжения (в пределах 50÷70 В), результаты измерений занести в таблицу 6.1.

6.3.5 Для каждого значения анодного напряжения построить сбросовую характеристику, откладывая по оси ординат значения анодного тока, а по оси абсцисс-значения тока в соленоиде. Для нахождения критического тока в соленоиде $I_{кр}$, соответствующего $B_{кр}$, провести до взаимного пересечения касательную к точке перегиба сбросовой характеристики (на участке спада) и прямую, соответствующую изменению минимальных значений анодного тока (рисунок 6.5). Полученные значения $I_{кр}$ занести в таблицу 6.2.

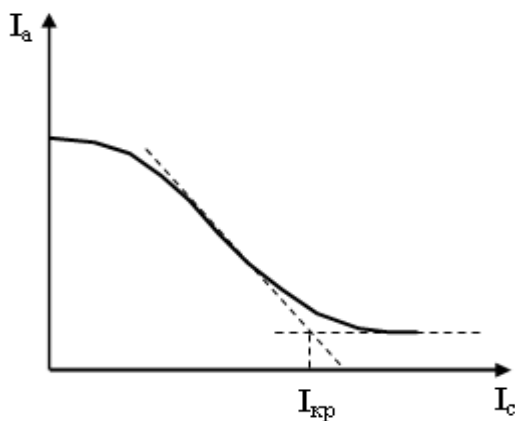


Рисунок 6.5

6.3.6 Для каждого критического значения тока в соленоиде $I_{кр}$ рассчитать индукцию магнитного поля $B_{кр}$ по формуле (6.9). Величины L , D , N , r_a указаны на передней панели кассеты ФПЭ - 03.

6.3.7 Вычислить e/m по формуле (6.8) для каждого значения $B_{кр}$ и определить среднее значение.

6.3.8 Вычислить погрешность полученной величины e/m .

6.3.9 Сравнить полученный результат с табличным значением удельного заряда электрона и указать причину расхождения, обратив внимание на сбросовую характеристику.

Т а б л и ц а 6.1

$U_a =$		$U_a =$		$U_a =$	
I_c, A	I_a, mA	I_c, A	I_a, mA	I_c, A	I_a, mA

Т а б л и ц а 6.2

U_a, B	$I_{кр}, A$	$B_{кр}, Tл$	$e/m, Кл/кг$

6.4 Контрольные вопросы

6.4.1 В чем суть метода магнетрона для определения удельного заряда?

6.4.2 Какой вид будет иметь траектория заряженной частицы, влетающей со скоростью \vec{v} в магнитное поле с индукцией \vec{B} , если: $\vec{v} \perp \vec{B}$, \vec{v} образует с \vec{B} некоторый угол.

6.4.3 Как движется заряженная частица, влетающая в однородное электрическое поле, силовые линии которого параллельны направлению скорости частицы?

6.4.4 Каково на рисунке направление векторов \vec{E} и \vec{B} , а также вектора \vec{v} скорости и силы Лоренца \vec{F}_L в произвольной точке траектории для случая коаксиальных электродов диода.

6.4.5 Каковы возможные траектории электронов при различных значениях B ? Что такое $B_{кр}$?

6.4.6 Как влияет изменение значений E и B на форму траектории электронов?

6.4.7 Как объяснить наблюдаемый ход сбросовой характеристики?

6.4.8 Как зависит удельный заряд электрона от r_a ?

6.4.9 Сравнить полученный результат с табличным значением удельного заряда электрона и указать причину расхождения, обратив внимание на сбросовую характеристику.

7 Лабораторная работа ЭМК-16. Изучение явления взаимной индукции

Цель работы: овладение методом экспериментального определения взаимной индуктивности двух катушек.

Задачи:

-измерить взаимную индуктивность двух коаксиально расположенных катушек;

-изучить зависимость взаимной индуктивности от взаимного расположения катушек, амплитуды и частоты тока в них.

7.1 Методика работы и описание экспериментальной установки

Рассмотрим два контура 1 и 2, расположенные на некотором расстоянии друг от друга (рисунок 7.1).

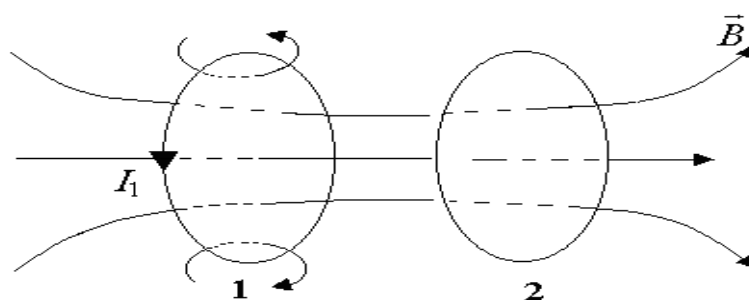


Рисунок 7.1

Если по одному из контуров (например, 1) пропустить ток, то магнитное поле \vec{B}_1 , создаваемое этим током, будет пронизывать контур 2. В случае, если ток I_1 будет переменным, то по закону электромагнитной индукции Фарадея переменное магнитное поле будет индуцировать в контуре 2 электродвижущую силу, которая вызывает появление (или изменение) тока в нем. Таким образом, контуры оказываются связанными между собой посредством электромагнитной индукции.

Числовое значение вектора магнитной индукции в каждой точке поля пропорционально току, создающему поле (закон Био-Савара-Лапласа), следовательно, магнитный поток, создаваемый первым током через контур 2, будет пропорционален току I_1 :

$$\Phi_{21} = \int_2 \vec{B}_1 d\vec{s}_2 = M_{21} I_1. \quad (7.1)$$

Аналогично, магнитный поток, пронизывающий первый контур при наличии тока I_2 во втором контуре, будет:

$$\Phi_{12} = M_{12} I_2. \quad (7.2)$$

Коэффициенты пропорциональности M_{21} и M_{12} в формулах (7.1 и 7.2) называются взаимной индуктивностью контуров. Они зависят от формы, размеров и взаимного расположения контуров, а также от магнитных свойств среды. При отсутствии ферромагнетиков эти коэффициенты всегда равны друг другу:

$$M_{12} = M_{21}. \quad (7.3)$$

В данной работе исследуется взаимная индуктивность двух коаксиальных цилиндрических катушек - длинной 1 и короткой 2. Короткая катушка 2 надета на длинную и может перемещаться вдоль её оси.

Если по одной из катушек (например, 1) пропустить переменный ток:

$$I_1 = I_{1m} \cos \omega t,$$

то во второй катушке возбуждается электродвижущая сила индукции:

$$\varepsilon_2 = -\frac{d\Phi_{21}}{dt} = -M_{21} \frac{dI_1}{dt} = M_{21} I_{1m} \sin \omega t.$$

Амплитудное значение ε_2 равно:

$$\varepsilon_{2m} = M_{21} I_{1m} \omega,$$

откуда

$$M_{21} = \frac{\varepsilon_{2m}}{I_{1m} \omega}. \quad (7.4)$$

Если ток пропустить через вторую катушку, электродвижущая сила будет возбуждаться в первой. Аналогично получим:

$$M_{12} = \frac{\varepsilon_{1m}}{I_{2m} \omega}. \quad (7.5)$$

Таким образом, пропуская по одной из катушек известный ток и измеряя амплитуду ЭДС, возбуждаемой в другой катушке, можно определить их взаимную индуктивность.

Электрическая схема установки для измерения взаимной индуктивности катушек 1 и 2 приведена на рисунке 7.2.

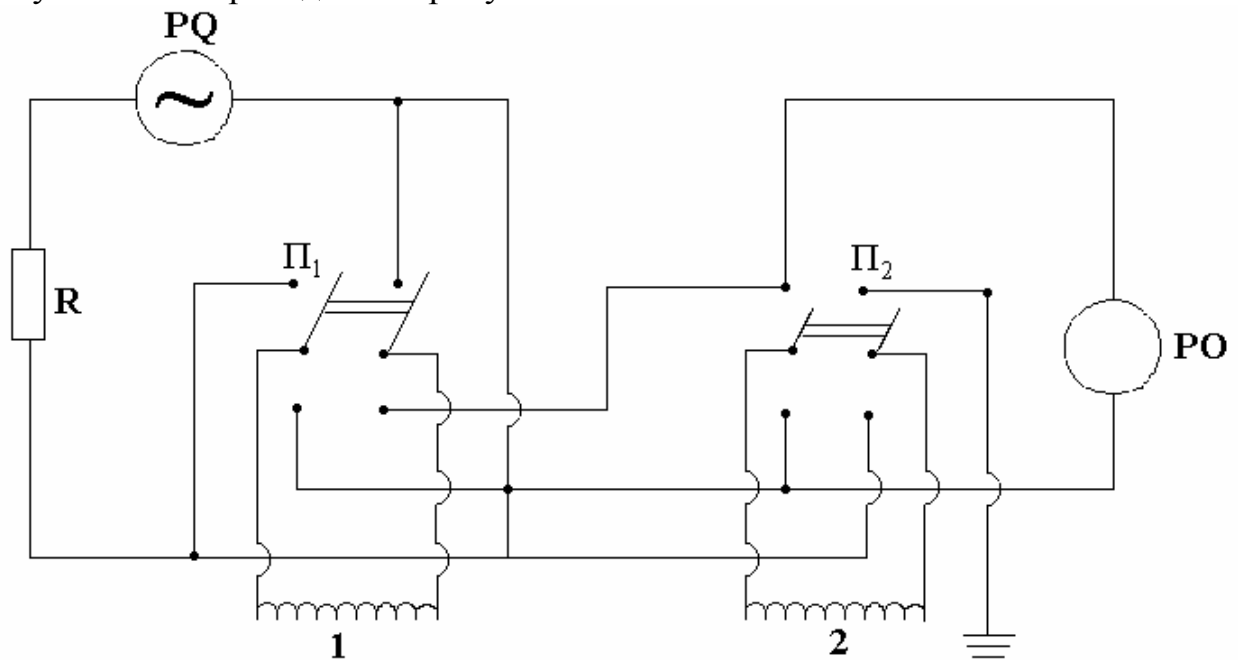


Рисунок 7.2

Питание одной из катушек осуществляется от генератора звуковой частоты PQ, напряжение:

$$U = U_m \cos \omega t ,$$

с которого подается через сопротивление R. Вольтметр, расположенный на панели генератора, измеряет действующее значение напряжения:

$$U_{\text{д}} = U_m / \sqrt{2} . \quad (7.6)$$

Сопротивление R выбирается таким образом, чтобы выполнялось соотношение:

$$R = \sqrt{R_1^2 + L_1^2 \omega^2}$$

В этом случае ток, протекающий через катушку 1, можно принять равным:

$$I_1 = \frac{U}{R} = \frac{U_m}{R} \cos \omega t = I_{1m} \cos \omega t , \quad (7.7)$$

где

$$I_{1m} = \frac{U_m}{R} .$$

С учетом (7.6), (7.7) и, принимая во внимание, что $\omega = 2\pi\nu$, формулу для вычисления взаимной индуктивности второй и первой катушек можно записать:

$$M_{21} = \frac{\varepsilon_{2m} \cdot R}{2\pi\nu \cdot U_{\text{д}} \sqrt{2}} = \frac{\varepsilon_{2m} R}{8,88 U_{\text{д}} \nu} . \quad (7.8)$$

Для измерения амплитуды ЭДС ε_{2m} используется осциллограф PO.

Чтобы определить взаимную индуктивность первой и второй катушек M_{12} , нужно пропускать ток через вторую катушку и измерять ЭДС, возбуждаемую в первой катушке. Для этого необходимо переключатели Π_1 и Π_2 перебросить в противоположное положение (рисунок 7.2).

7.2 Порядок выполнения работы и обработка результатов измерения

7.2.1 Измерение взаимной индуктивности катушек M_{21} и M_{12} и исследование её зависимости от взаимного расположения катушек:

- подготовить установку к работе: проверить подключение генератора PQ и осциллографа PO; с помощью штока со шкалой, показывающей взаимное расположение катушек, установить подвижную катушку 2 в крайнее положение;

- задать напряжение U_3 и частоту ν генератора (по указанию преподавателя), подать напряжение на катушку 1 (с помощью переключателя Π_1), а ЭДС катушки 2 подать на осциллограф (с помощью переключателя Π_2);

- определить ε_{2m} с помощью осциллографа. Для этого необходимо измерить в делениях шкалы расстояния по вертикали между крайними точками изображения сигнала Н, записать коэффициент k усиления канала (переключатель "V/дел."). Амплитуду ε_{2m} определить по формуле:

$$\varepsilon_{2m} = \frac{k \cdot H}{2}; \quad (7.9)$$

- перемещая катушку в противоположное крайнее положение через 1 см, записывать значения ε_{2m} ;

- по формуле (7.8) рассчитать значения M_{21} . Все данные занести в таблицу 7.1;

Т а б л и ц а 7.1

$U_3 = \dots B$		$\nu = \dots Гц$		$R = 10^4 \text{ Ом}$	
$z, \text{ см}$	ε_{2m}		$z, \text{ см}$	ε_{1m}	
	дел	B		Дел	B
	$k = \dots$			$k = \dots$	

- «поменяв местами» катушки 1 и 2 (с помощью переключателей Π_1 и Π_2), повторить измерения пп. 7.3.1.3; 7.3.1.4 и рассчитать M_{12} ;

- построить график зависимости M_{21} и M_{12} как функции координаты z (z - расстояние между центрами катушек 1 и 2).

7.2.2 Измерение взаимной индуктивности катушки M_{21} при различных значениях амплитуды питающего напряжения:

- поставить катушку 2 в положение относительно катушки 1;

- задать частоту питающего генератора PQ по указанию преподавателя;
- измерить амплитуду ЭДС ε_{2m} при различных значениях U_3 в цепи катушки 1 в интервале 0 - 5 В через 0,1 В;
- рассчитать M_{21} (по формуле 16.8);
- полученные данные занести в таблицу 7.2.

Т а б л и ц а 7.2

$\nu = \dots \text{Гц}$		$R = 10^4 \text{ Ом}$				$k = "V/\text{дел.}"$			
$U_3, \text{ В}$									
$\varepsilon_{2m}, \text{ В}$									
$M_{21}, \text{ Гн}$									

7.2.3 Измерение M_{21} при различных частотах питающего напряжения:

- поставить катушку 2 в среднее положение относительно катушки 1;
- задать амплитуду напряжения генератора по указанию преподавателя (в пределах 0-5 В);
- измерить амплитуды ε_{2m} при различных частотах колебаний от 5 до 20 кГц (не менее 10 значений);
- рассчитать M_{21} . Полученные данные занести в таблицу 7.3;

Т а б л и ц а 7.3

$U_3 = \dots \text{ В}$		$R = 10^4 \text{ Ом}$							
$\nu = \dots \text{Гц}$									
$\varepsilon_{2m}, \text{ В}$									
$M_{21}, \text{ Гн}$									

- проанализировать полученные в каждом задании результаты. Сделать выводы относительно того, как влияют на взаимную индуктивность катушек их относительное расположение, амплитуда и частота тока, протекающего по одной из них.

7.3 Контрольные вопросы

- 7.3.1 В чем выражается магнитная связь двух или нескольких контуров?
- 7.3.2 От чего зависит взаимная индуктивность двух контуров?
- 7.3.3 В чем сущность методики определения взаимной индуктивности катушек в данной работе?
- 7.3.4 Чему равна ЭДС взаимной индукции двух контуров?
- 7.3.5 Как в данной работе измеряется ЭДС взаимной индукции?

Список литературы

- 1 Савельев И.В., Курс общей физики: в 4-х т.: Учеб. пособие для вузов. т.2: Электричество и магнетизм, оптика: Учеб. пособие. / И.В. Савельев; под ред. В.И. Савельева. - 2-е изд. стереотип. - М.: КноРус, 2012. - 576 с.
- 2 Трофимова Т.И., Основы физики. Электродинамика: Учеб. пособие / Т.И. Трофимова. - М.: КноРус, 2011. - 272 с.
- 3 Курс физики. Под ред. Лозовского В.Н. – СПб.: Лань, 2001. – т.1, 2.
- 4 Иродов И.Е., Электромагнетизм. Основные законы: Учеб. пособие / И.Е. Иродов. - М.: Бином, 2012. - 319 с. - (технический университет. Общая физика).
5. Лабораторный практикум по физике. Под ред. Барсукова К.А., Уханова Ю.И. – М.: Высш. шк., 1988.
- 6 Черкашин В.П. Электричество и магнетизм: Лабораторные работы. – К.: Вища шк. Головное изд-во, 1986.

Содержание

Введение	1
1 Лабораторная работа. ЭМК-10 Исследование магнитных полей методом моделирования	4
2 Лабораторная работа. ЭМК-11 Измерение горизонтальной составляющей магнитной индукции Земли	11
3 Лабораторная работа. ЭМК-12 Изучение магнитного поля соленоида с помощью эффекта Холла	14
4 Лабораторная работа. ЭМК-13 Определение магнитных характеристик ферромагнетиков и петли гистерезиса в переменных магнитных полях....	17
5 Лабораторная работа. ЭМК-14 Изучение магнитных свойств железа...	22
6 Лабораторная работа. ЭМК-15 Определение удельного заряда электрона методом магнетрона	27
7 Лабораторная работа. ЭМК-16 Изучение явления взаимной индукции	32
Список литературы	37

Туркестан Сейдахметович Байпакбаев
Жарилкасин Искаков
Сулукас Низаматдиновна Сарсенбаева

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК. МАГНЕТИЗМ

Методические указания к выполнению лабораторных работ
для студентов всех специальностей

Редактор Н.М. Голева
Специалист по стандартизации Н.К. Молдабекова

Подписано в печать
Тираж 20 экз.
Объем 2,31 уч. – изд.л.

Формат 60×84 1/16
Бумага типографская № 1
Заказ ____ . Цена 1155 тн.

Копировально-множительное бюро
некоммерческого акционерного общества
«Алматинский университет энергетики и связи»

Кафедра физики

"УТВЕРЖДАЮ"

Проректор по УМР АУЭС

_____С.В. Коньшин

" ____ " _____ 2017 г.

Электрический ток. Магнетизм
Методические указания к выполнению
лабораторных работ для студентов всех специальностей

СОГЛАСОВАНО:

Начальник УМО

" ____ " _____ 2017 г.

Рассмотрено и одобрено на
заседаний кафедры физики
Протокол №1 от 22.09.2016 г.
Зав. кафедрой физики

Председатель ОУМК и МОиЭ

_____ Б.К. Курпенов

_____ М.Ш. Карсыбаев

Редактор

_____ Г.А. Акетаева

" ____ " _____ 2017 г.

Составители:

_____ Ж.Искаков

_____ Т.С. Байпакбаев

Специалист по стандартизации

_____ Н.К. Молдабекова

« ____ » _____ 2017 г.

_____ С.Н. Сарсенбаева