

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Саратовский государственный аграрный университет
имени Н. И. Вавилова»

МАГНЕТИЗМ И МАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Методические указания по выполнению лабораторных работ

для студентов I I курса

Направление подготовки
35.03.06 Агроинженерия

Профиль подготовки
Электрооборудование и электротехнологии

Саратов 2015

Магнетизм и магнитные явления: метод. указания по выполнению лабораторных работ для направлений подготовки 35.03.06 Агроинженерия/ Электрооборудование и электротехнологии/ Сост. Е.В.Рыжова, О.А.Плеханова, К.В. Кочелаевская, Е.А.Пилипенко, В.М.Райгородский// ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ». – Саратов, 2015. – 58 с.

Методические указания по выполнению лабораторных работ составлены в соответствии с программой дисциплины и предназначены для студентов направлений подготовки 35.03.06 Агроинженерия/ Электрооборудование и электротехнологии; содержат краткое описание лабораторных методов изучения основных законов электричества и магнетизма. Направлены на формирование у студентов знаний об основных закономерностях физических явлений, применение этих знаний для понимания процессов, происходящих в природе, для решения профессиональных задач, навыков проведения физического эксперимента.

ВВЕДЕНИЕ

Физика - одна из важнейших естественнонаучных дисциплин, изучающая простейшие и вместе с тем наиболее общие закономерности явлений природы, свойства и строение материи и законы её движения. Современная физика – настолько обширная область естествознания, что многие ее разделы представляют собой самостоятельные, хотя и связанные между собой научные дисциплины. В настоящее время физика тесно связана со многими областями науки и техники (биофизика, физическая химия, археология, медицина, астрофизика).

При изучении физических закономерностей очень важным является их экспериментальное исследование. При выполнении лабораторных работ студенты приобретают навыки понимать наблюдаемые процессы, развивают умения пользования измерительными приборами, обработки полученных результаты, необходимые в дальнейшем процессе обучения.

В пособии представлены теоретические и справочные материалы, необходимые для грамотного проведения эксперимента, расчета и оценки полученных результатов.

По каждой лабораторной работе предусмотрены: минимум теоретического материала, ход выполнения работы, перечень необходимого оборудования, форма записи, контрольные вопросы для закрепления теоретического материала и список литературы.

Лабораторная работа №1

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Цель работы: научиться определять технические возможности электроизмерительных приборов по условным обозначениям на шкале, производить измерения и обрабатывать результаты измерений, научиться рассчитывать значения шунтов и добавочных сопротивлений амперметра и вольтметра.

Приборы и принадлежности: амперметры, вольтметры, омметры, ваттметры, набор сопротивлений, источник постоянного тока, ключи, реостат, потенциометр.

ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Для измерения электрических и магнитных величин применяют электроизмерительные приборы: гальванометры, амперметры, вольтметры и др., а также комбинации этих приборов в различных измерительных схемах. Электрические и магнитные величины можно измерить по различным проявлениям электрического и магнитного полей и электрического тока. При этом измерение может быть непосредственным (например, измерение электрического заряда электрометром) или сравнительным (измерение сопротивления мостовой схемой).

Измерительная аппаратура разделяется на меры и измерительные приборы.

Меры – это тела или устройства, предназначенные для измерений, и воспроизводящие одно или несколько измерений значений данной физической величины и сравнения с эталоном. Например, эталоны сопротивления, емкости, ЭДС.

Измерительные приборы - устройства, предназначенные для измерений и имеющие части, которые воспринимают измеряемую величину и преобразуют ее в показания. Например, вольтметр, амперметр.

Рассмотрим вопрос об измерительных приборах.

В зависимости от той задачи, которую выполняют различные измерительные приборы, они подразделяются на образцовые и рабочие приборы.

Образцовые измерительные приборы предназначены для проверки и градуировки по ним рабочих приборов. Образцовые приборы высшего разряда проверяются по эталонам.

Рабочие измерительные приборы применяются для практических измерений в лабораториях, ремонтных мастерских и т.д.

Приборы разделяются:

1. По характеру замера – на приборы с непосредственным отсчетом (аналоговые), цифровые и самозаписывающие.

Электроизмерительные приборы, показания которых являются непрерывной функцией измеряемой величины, называются *аналоговыми* приборами. К аналоговым приборам относятся, например, стрелочные приборы. Угол поворота стрелки амперметра является непрерывной функцией изменяющейся силы тока в цепи, в которой производится измерение. В этом случае непрерывное увеличение угла поворота стрелки аналогично непрерывному росту силы тока в цепи.

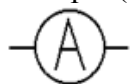
Цифровыми приборами называются такие приборы, в которых измеряемая величина представляется в дискретно-цифровой форме: результат измерения представляется в виде набора светящихся цифр. В цифровом приборе автоматически осуществляется преобразование непрерывной измеряемой величины в дискретную

(прерывную) форму и выдача результата в виде числа, появляющегося на отсчётном устройстве.

Аналоговые приборы по своим характеристикам во многом уступают цифровым, но из-за своей относительно низкой стоимости и достаточно высокой надёжности используются в измерительной практике.

2. По условиям работы – на стационарные, переносные и транспортные.

3. По роду измеряемой величины – на амперметры (измеряют силу тока), вольтметры (измеряют напряжение) и т.д. При этом на шкале наносят обозначения:



Амперметр



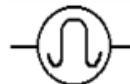
Вольтметр



Гальванометр



Ваттметр



Омметр

4. По принципу работы – магнитоэлектрические, электромагнитные, электродинамические и т.д. Символ, указывающий принцип действия прибора, также наносится на шкалу.



Магнитоэлектрический прибор с подвижной рамкой



Магнитоэлектрический прибор с подвижным магнитом



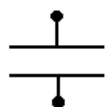
Электромагнитный прибор



Электродинамический прибор



Ферродинамический прибор



Электростатический прибор



Индукционный прибор



Вибрационный прибор

Кроме обозначения системы на шкале помещают другие условные знаки:



Прибор постоянного тока



Прибор переменного тока



Прибор постоянного и переменного тока



Прибор изолирован от корпуса и испытан напряжением, превышающим 500 В (например, 2 кВ)



Прибор работает от тока напряжением менее 500 В



Прибор испытанию прочности изоляции не подлежит



Прибор или его часть находятся под напряжением.



Категория защищенности от влияния внешних магнитных полей



Прибор применять при вертикальном расположении шкалы



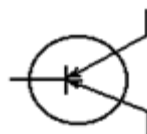
Прибор применять при горизонтальном расположении шкалы



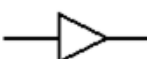
Прибор применять при наклонном положении шкалы относительно горизонтальной плоскости



Прибор может быть ориентирован во внешнем магнитном поле



В цепи прибора используется транзистор (электронный преобразователь)



В цепи прибора используется диод (выпрямитель)

1.0

Класс точности прибора

Показатель класса точности - число, указывающее наиболее допустимую для прибора данного класса приведённую погрешность. Приведённая погрешность - это величина, равная отношению абсолютной погрешности ΔX к предельному значению

величины $X_{пред}$, которую можно измерить по шкале данного прибора. Приведённая погрешность выражается в процентах:

$$\varepsilon_o = \frac{\Delta X}{X_{пред}} \cdot 100\% \quad (1.1)$$

Классы точности приборов устанавливаются ГОСТами. Например, на электроизмерительные аналоговые приборы установлен 2-ой класс. Наиболее точные приборы имеют классы 0,1; 0,15; 0,25. Более грубые по точности приборы имеют классы 2,00; 2,50; 4,00. Показатель класса прибора указывается обычно на его шкале. Зная класс прибора, можно определить максимальную абсолютную погрешность данного прибора, которая не превышает ни в какой части шкалы.

К основным характеристикам электроизмерительных приборов относятся:

- **предел измерения $X_{пред}$** - то максимальное значение тока, напряжения, которые можно измерять данным прибором. Обычно один прибор имеет несколько пределов (3В, 30В, 300В). Чтобы перейти с одного предела на другой, необходимо ручку переключателя поставить в соответствующее положение.

- **цена деления C** - определяется делением значения предела измерения на число делений шкалы, т.е. цена деления - это величина, равная отношению приращения измеряемой величины к приращению числа делений.

$$C = \frac{\Delta X}{\Delta n} = \frac{\Delta I}{\Delta n} = \frac{\Delta U}{\Delta n} \quad (1.2)$$

- **чувствительность S** - величина, обратная цене деления, т.е. величина, равная отношению приращения угла поворота стрелки к приращению измеряемой величины.

$$S = \frac{1}{C} = \frac{\Delta X}{\Delta n} = \frac{\Delta \varphi}{\Delta I} \quad \text{или} \quad S = \frac{\Delta n}{\Delta X} = \frac{\Delta n}{\Delta I} \quad (1.3)$$

- **погрешностью измерительного прибора** (основной) называют разность между измеренным значением величины и ее действительным значением (т.е. измеренным образцовым прибором).

По способу числового выражения выделяют абсолютные погрешности, относительные и приведённые.

Абсолютная погрешность ΔX определяется как разность между показаниями приборов проверяемого X_n и образцового X_o .

$$\Delta X = |X_n - X_o| \quad (1.4)$$

Относительная погрешность определяется как отношение абсолютной погрешности проверяемого прибора к действительному значению измеряемой величины, выраженное в процентах:

$$\varepsilon = \frac{\Delta X}{X} \cdot 100\% \quad (1.5)$$

Если величина абсолютной погрешности обычно бывает одного порядка в разных частях шкалы прибора, то относительная погрешность имеет наибольшее значение в начале шкалы и наименьшее в конце даже для прибора с равномерной шкалой.

Рассмотрим вопрос о системах, используемых в приборах.

1. Приборы магнитоэлектрической системы.

Магнитоэлектрические приборы основаны на действии постоянного магнита на катушку, через которую идет измеряемый ток.

Основным магнитоэлектрическим прибором является гальванометр – высокочувствительный прибор, служащий для измерения слабых токов. На рис.1 изображена схема стрелочного гальванометра. Катушка (рамка) К из тонкой проволоки может вращаться между полюсами постоянного магнита. Для усиления магнитного поля внутри расположен железный сердечник С. При пропускании тока через катушку она стремится установиться по полю. Вращающий момент $M_{вр}$, действующий на катушку, пропорционален току I , т.е. $M_{вр} = k_1 I$, где коэффициент k_1 зависит от напряженности поля, создаваемого магнитом, числа витков катушки, размеров и взаимного расположения элементов прибора.

При повороте катушки и связанной с ней стрелки на угол φ спиральная пружина П деформируется и создает противодействующий момент $M_{упр}$.

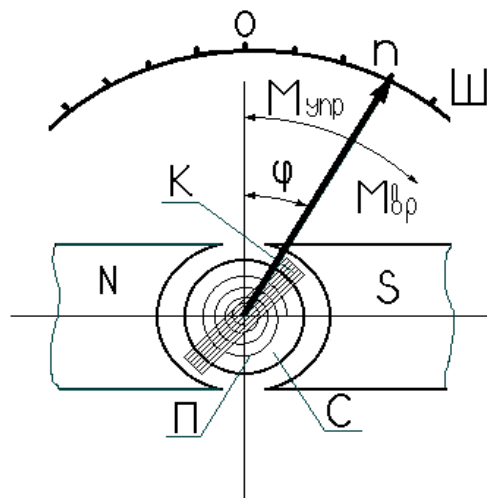


Рис.1.1 Магнитоэлектрическая система

Этот момент пропорционален углу закручивания $M_{упр} = k_2 \varphi$, где коэффициент k_2 зависит от размеров и материала пружины. При равновесии $M_{вр} = M_{упр}$, т.е. $k_1 I = k_2 \varphi$; отсюда

$$I = \frac{k_2}{k_1} \varphi, \quad I = k \varphi, \quad \text{т.е. } I \sim \varphi \sim n, \quad (1.4)$$

где n - число делений, отмечаемое стрелкой на пропорциональной шкале Ш. Как видно из соотношения (1.4), шкала прибора магнитоэлектрической системы равномерная.

2. Приборы электромагнитной системы.

На рис.1.2 изображена схема прибора электромагнитной системы. Когда через катушку К проходит ток I , то в ней возникает магнитное поле, которое втягивает в катушку железный сердечник С, подвешенный на пружине. Чем больше ток, тем больше растяжение пружины и поворот, связанной с ней стрелки. По катушке прибора

могут непосредственно пропускаться большие токи. В зависимости от характера тока – постоянного или переменного – градуировка шкалы будет различной.

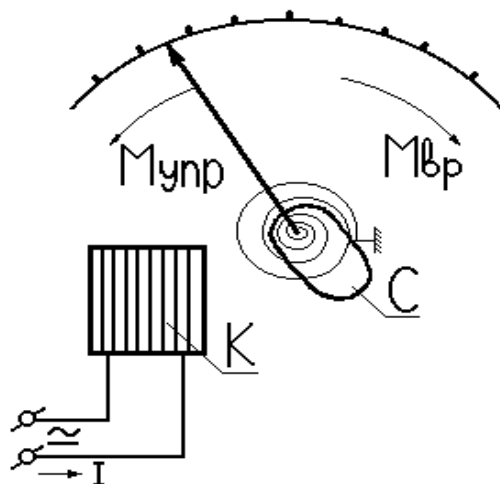


Рис.1.2. Электромагнитная система

3. Приборы электродинамической системы.

На рис.1.3 изображен электродинамический прибор - ваттметр. Первая внешняя большая катушка с малым сопротивлением включена в цепь последовательно. По ней идет ток I , как в измеряемой цепи; он создает в катушке магнитное поле с индукцией B , пропорциональной току I . Внутри этой катушки на перпендикулярной к ней оси перемещается вторая катушка с большим сопротивлением, которая включается как вольтметр. Ток в этой катушке I_1 пропорционален падению напряжения U . Магнитное поле первой катушки будет действовать на вторую катушку. В результате появится крутящий момент, пропорциональный магнитной индукции B и току во второй катушке I_1 , т.е. $M_{вр} = BI_1$. Так как $B \sim I$, а $I_1 \sim U$, то $M_{вр} \sim IU$.

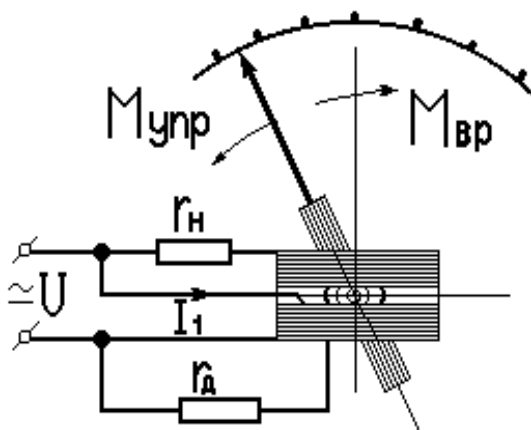


Рис.1.3. Электродинамическая система

Поворачиваясь, вторая катушка растягивает спиральную пружину, и крутящий момент уравновешивается моментом упругих сил. Тогда угол поворота катушки и связанной с ней стрелки оказывается пропорциональным произведению IU , т.е. мощности, выделяемой током в цепи:

$$\varphi \sim M_{unp} = M_{вр} \sim IU. \quad (1.5)$$

Существует ряд других, менее употребляемых, систем электроизмерительных приборов. Измерение некоторых величин требует составления специальных измерительных схем.

Для регулирования силы тока в цепи в нее включают последовательно переменное сопротивление – **реостат**. Ползунковый реостат, применяемый на практике, представляет собой голый никелевый провод определенного сечения, намотанный на керамический цилиндр. На концах провода имеются клеммы. Провод покрыт тонким слоем непроводящей ток окалины, поэтому витки изолированы друг от друга. Над обмоткой расположен металлический стержень, по которому перемещается движок. Своими контактами он прижат к виткам обмотки. От трения движка о витки проволоки слой окалины под его контактами стирается, ток проходит от витков проволоки через контакты движка в стержень, имеющий на конце зажим. В зависимости от положения движка ток проходит через часть основного провода, сопротивление которого пропорционально его длине. Обозначение реостата в электрических схемах указано на рис.4. В электрических схемах используются также **магазины сопротивлений** – штепсельные, рычажные и т.д.

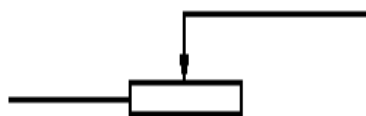


Рис.1.4. Реостат

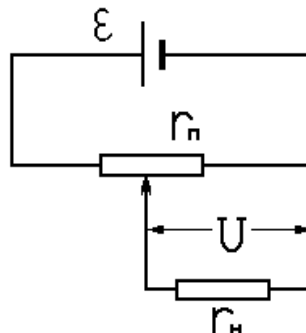


Рис.1.5. Потенциометр

Для деления напряжения используются все три зажима реостата. В этом случае реостат включается по схеме **потенциометра** (рис.1.5).

Полное сопротивление потенциометра включается последовательно с источником напряжения. Если в цепи необходимо иметь не полное напряжение, а лишь часть его U , то цепь включают между одной из крайних точек и движок. Сопротивление цепи должно быть большим по сравнению с сопротивлением потенциометра, которое в свою очередь должно быть больше, чем сопротивление источника, т.е. $r_u \gg r_n \gg r$. При этом условии напряжение в цепи U прямо пропорционально длине участка потенциометра от клеммы до движка.

Для измерения силы тока в цепи используется амперметр. Его включают последовательно с нагрузкой. Пусть сопротивление амперметра - R_A , а сопротивление цепи - R_H , тогда при включении амперметра сопротивление цепи станет равным:

$$R = R_H + R_A = R_H \left(1 + \frac{R_A}{R_H}\right).$$

Чтобы амперметр заметно не менял общего сопротивления цепи, его собственное сопротивление должно быть малым ($R_A \ll R_H$).

Если необходимо измерить силу тока, превышающую диапазон измерений амперметра, то параллельно амперметру включают сопротивление, значение которого меньше сопротивления амперметра, т.е. **шунт**. Шунт подбирается так, что ток через прибор не превышает допустимого значения (рис.6).

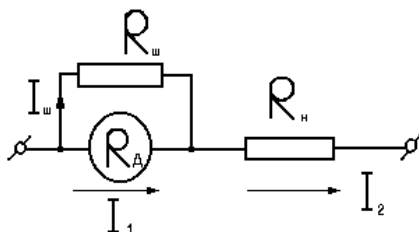


Рис.1.6. Шунт к амперметру

Пусть требуется увеличить диапазон прибора в n раз, т.е. $n = \frac{I_2}{I_1}$. Если R_A - внутреннее сопротивление амперметра, I_1 - прежний диапазон прибора, I_2 - новый диапазон прибора, то, учитывая, что при параллельном соединении силы токов обратно пропорциональны сопротивлениям, получим:

$$\frac{I_1}{I_2 - I_1} = \frac{R_{ш}}{R_A}, \quad R_{ш} = R_A \frac{I_1}{I_2 - I_1} = \frac{R_A}{n - 1}. \quad (1.6)$$

Тогда сопротивление амперметра можно найти по формуле:

$$R_A = (n - 1) R_{ш}. \quad (1.7)$$

Для измерения напряжения в цепи используют вольтметры. Чтобы измерить напряжение между точками цепи, прибор включают параллельно этому участку. В этом случае на вольтметр отвлекается часть основного тока, поэтому ток и напряжение в цепи меняются. Пусть R_V - сопротивление вольтметра, подключаемого параллельно нагрузке сопротивлением R_H . Тогда общее сопротивление

$$R = \frac{R_H R_V}{R_H + R_V} = \frac{R_H}{1 + \frac{R_H}{R_V}}.$$

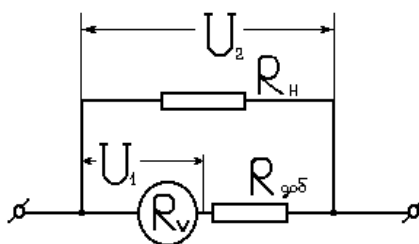


Рис.1.7. Дополнительное сопротивление к вольтметру

Видно, что чем больше сопротивление вольтметра, тем меньше вносимое им искажение. Вольтметр должен иметь большое сопротивление ($R_V \gg R_H$).

Для расширения пределов измерения вольтметра последовательно с ним включается дополнительное сопротивление $R_{доб}$, на котором создается нужное падение напряжения (рис.1.7).

Допустим, предел измерения вольтметра надо увеличить в n раз, т.е. $n = \frac{U_2}{U_1}$. Если

$R_{доб}$ - дополнительное сопротивление, R_V – внутреннее сопротивление вольтметра, U_2 - новый, а U_1 - прежний предел измерений вольтметра, то учитывая, что через вольтметр и добавочное сопротивление протекает один и тот же ток, получим:

$$I = \frac{U_1}{R_V} = \frac{U_2 - U_1}{R_{доб}}, \quad R_{доб} = R_V \frac{U_2 - U_1}{U_1} = R_V (n - 1). \quad (1.8)$$

Таким образом, можно подсчитать внутреннее сопротивление вольтметра:

$$R_V = \frac{R_{доб}}{n - 1}. \quad (1.9)$$

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Упражнение 1. Изучение электроизмерительного прибора.

Получите у преподавателя или лаборанта электроизмерительный прибор, внимательно рассмотрите условные обозначения на приборе. Перед выполнением работы следует подготовить таблицу для занесения результатов наблюдений:

Таблица 1.1

Измеряемая величина	Природа тока	Принцип действия	Класс точности	Предел измерений	Цена деления	Чувствительность

1. Проведите классификацию прибора:
 - 1.1. по роду измеряемой величины,
 - 1.2. по роду тока,
 - 1.3. по принципу действия,
 - 1.4. по степени точности (классу точности).
2. Далее изучая шкалу, определите:
 - 2.1. предел измерения прибора,
 - 2.2. цену деления прибора (на многопредельном приборе выбрать одну из шкал),
 - 2.3. чувствительность прибора,
3. Расшифруйте оставшиеся на шкале прибора символы.
4. Начертите электрическую схему, включающую источник тока, сопротивление и изучаемый электроизмерительный прибор.
5. Соберите цепь по схеме и проведите измерения силы тока или напряжения в зависимости от выбранного прибора.

6. Определите погрешность измерений.

6.1. Найдите абсолютную погрешность прибора ΔX , воспользовавшись из формулы (1.1), исходя из класса точности прибора ε_o и предельного значения $X_{пред}$.

6.2. Найдите относительную погрешность измерений ε , воспользовавшись формулой (1.5), где X – измеренная величина.

Упражнение 2. Расширение пределов измерения прибора.

А) Расширение пределов измерения амперметра.

Перед выполнением работы следует подготовить таблицу для занесения результатов наблюдений:

Таблица 1.2А

№ п/п	$R_{ш}$, Ом	I_2 , А	I_1 , А	n	$n_{ср}$	R_A , Ом
1						
2						
3						

1. Соберите цепь, принципиальная схема которой представлена на рис.8.

2. По указанию преподавателя возьмите сопротивления, из которых вы будете выбирать шунты.

3. Получив разрешение преподавателя или лаборанта, замкните цепь (ключ S_1), при этом ключ S_2 выключен. Сравните показания эталонного (I_2) и исследуемого (I_1) амперметров.

4. Включите шунт с помощью ключа S_2 . Запишите в таблицу 2А показания эталонного и исследуемого амперметра.

5. По формуле $n = \frac{I_2}{I_1}$ определите кратность расширения пределов амперметра. Занесите данные в таблицу 2А.

6. Измените значение тока в цепи с помощью реостата R .

7. Повторите п.4-6 не менее трех раз.

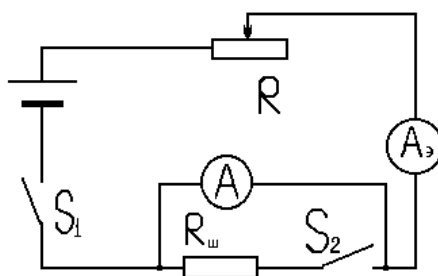


Рис.1.8

8. Найдите среднее значение $n_{ср}$. Результаты запишите в таблицу 2А.

9. Рассчитайте внутреннее сопротивление амперметра по формуле (1.7).

10. Рассчитайте сопротивление шунта $R_{ш}$ (формула (1.6)) для увеличения пределов измерений в n раз (n задается преподавателем).

Б) Расширение пределов измерения вольтметра.

Перед выполнением работы следует подготовить таблицу для занесения результатов наблюдений:

Таблица 1.2Б

№ п/п	$R_{доб}$, Ом	U_2 , А	U_1 , А	n	$n_{ср}$	R_V , Ом
1						
2						
3						

1. Соберите цепь, принципиальная схема которой представлена на рис.1.9.
2. По указанию преподавателя возьмите сопротивления, из которых вы будете выбирать добавочные сопротивления.
3. Получив разрешение преподавателя или лаборанта, замкните цепь (ключ S_1), при этом ключ S_2 выключен.
4. С помощью потенциометра R установите стрелку V_3 во второй половине шкалы.
5. Включите ключ S_2 . Сравните показания приборов. Запишите в таблицу 2Б показания эталонного (U_2) и исследуемого (U_1) вольтметров.
6. По формуле $n = \frac{U_2}{U_1}$ определите кратность расширения пределов вольтметра.

Занесите данные в таблицу 1.2Б.

7. Изменяя напряжение в цепи с помощью потенциометра R , запишите показания приборов для трех различных значений U_2 в таблицу 1.2Б.
8. Найдите $n_{ср}$.
9. По формуле (1.9) найдите внутреннее сопротивление вольтметра на данном диапазоне измерений.

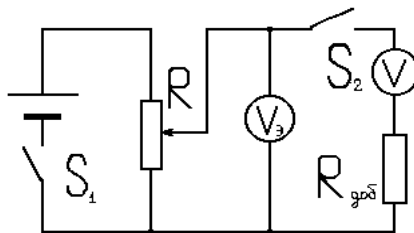


Рис.1.9

10. Вычислите величину $R_{доб}$ при n , заданном преподавателем (формула (1.8)).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как подразделяются приборы по способу измерений, по условиям работы, по роду измеряемой величины?
2. Изобразите символы, указывающие принцип действия.
3. Опишите принцип действия изучаемого прибора.
4. Что такое класс точности, предел измерения, цена деления и чувствительность прибора?
5. Как определить абсолютную и относительную погрешности измеряемой величины?
6. Расскажите правила включения амперметра и вольтметра в электрическую цепь.
7. Какие требования предъявляются к приборам для измерения силы тока и напряжения?
8. Как можно расширить пределы измерения амперметра и вольтметра?
9. Начертите схемы, позволяющие увеличить пределы измерения силы тока и напряжения?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калашников, С.Г. Электричество / С.Г. Калашников. – 6-е изд., стереот. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 624 с.
2. Трофимова, Т.И. Курс физики: Учебное пособие для инженерно-технических специальностей вузов/ Т.И.Трофимова.- 18-е изд., стер..- М: Академия, 2010.- 560с
3. Савельев, И.В. Курс общей физики.В 3-х т.: Учебное пособие для студ.вузов/ И.В.Савельев.- 10-е изд.,стер..- СПб: Лань. - (Учебники для вузов. Специальная литература) Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика.- 2008.- 496с.

Лабораторная работа № 2

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ

Цель работы: ознакомиться со структурой магнитного поля Земли, изучить теорию и практику измерения его горизонтальной составляющей с помощью тангенс-гальванометра.

ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Земля представляет огромный магнит. Магнитное поле земли вблизи поверхности имеет дипольный характер подобно полю намагниченного шара (рис.2.1). **Силовые линии магнитного поля** выходят из центра Земли через Южное полушарие и, обогнув Землю, возвращаются к её центру через Северное полушарие. Магнитные полюса при этом смещены относительно географических. Магнитный полюс, находящийся вблизи южного географического, называется северным, а вблизи северного географического полюса — южным.

Магнитная ось наклонена относительно Земной на $11,5^\circ$. Магнитное поле складывается из постоянного (спокойного, или устойчивого) поля, создаваемого магнетизмом планеты, и переменного, обусловленного электрическими токами, текущими над Землёй и в земной коре.

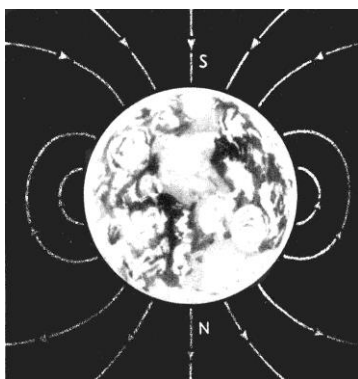


Рис.2.1.

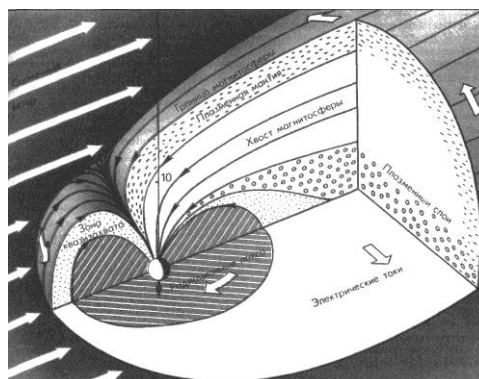


Рис.2.2

Магнитное поле в значительной мере экранирует Землю от влияния космических излучений, солнечного ветра. Магнитное поле при удалении от Земли ограничено в пространстве (рис.2.2), оно имеет сферическую форму на расстоянии 10 — 15 радиусов Земли на освещённой Солнцем стороне и далеко простирается в виде кометного хвоста на противоположной стороне. Это пространство, пронизанное магнитными силовыми линиями, называется **магнитосферой**. В определённых зонах магнитосферы,

радиационных поясах, имеется поток частиц, захваченных магнитным полем. Изменения этих и ионосферных токов вызывают как медленные, так и сравнительно быстрые изменения, называемые магнитными бурями. Заряженные частицы отклоняются к полюсам и вызывают полярные сияния. Магнитные возмущения имеют циклический характер и связаны с процессами, происходящими на Солнце. Поток ионизированных частиц (солнечный ветер) обдувает Землю с периодом 27 суток. Имеются вариации, связанные с 11-летним циклом солнечной активности.

Разработанной количественной теории геомагнитного поля пока не существует. Причиной поля считают вихревые токи в верхних слоях жидкого металлического ядра Земли.

Со временем магнитные полюса меняют своё положение, претерпевая вековые вариации. Компоненты магнитного поля над поверхностью меняются в следующих пределах: полный вектор магнитной индукции B_0 — от 62 до 73 мкТл, горизонтальная составляющая B_H — от 0 до 41 мкТл.

Вектор магнитной индукции и вектор напряжённости поля в каждой точке имеют составляющие в прямоугольной системе координат XYZ: северная, восточная и вертикальная. По отношению к географическим координатам геомагнитное поле также имеет три составляющих: горизонтальную B_H , магнитное наклонение D (угол между географическим и магнитным меридианом) и магнитное склонение θ (угол между B и плоскостью горизонта). Таким образом, вектор магнитной индукции $\vec{B}$ в различных точках земной поверхности направлен под различные углы к горизонтальной плоскости и, кроме того, имеет различные значения модуля.

Модуль горизонтальной составляющей B_H можно определить с помощью тангенс-гальванометра. **Тангенс-гальванометр** представляет собой круговой проводник — плоскую вертикальную катушку радиуса r , содержащую N витков. В центре катушки в горизонтальной плоскости расположена магнитная стрелка, которая может вращаться вокруг вертикальной оси.

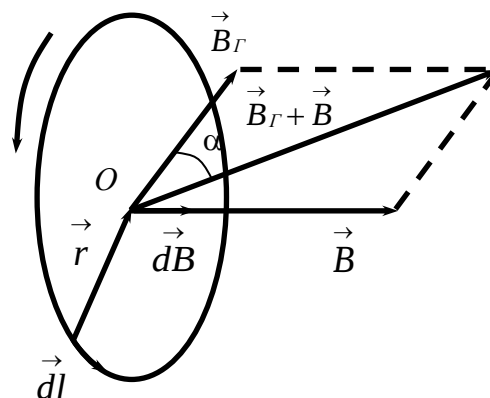


Рис. 2.3.

При отсутствии тока в круговом проводнике стрелка располагается вдоль горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли $\vec{B}_H$. Вертикальная составляющая на положение стрелки влияния не оказывает. При подготовке к измерениям тангенс-гальванометр ориентируют так, чтобы прямая, соединяющая концы стрелки, располагалась в плоскости кругового проводника.

Если по круговому проводнику пропустить ток силы I , то возникнет магнитное поле тока. Вычислим магнитную индукцию $\vec{B}$ этого поля в центре кругового тока, в том месте, где располагается стрелка.

Пусть один виток кругового проводника располагается в плоскости, перпендикулярной плоскости рисунка (рис. 3). Элемент $\vec{dl}$ проводника с током силы I (направление тока изображено стрелкой) создает в центре O согласно закону Био-Савара-Лапласа магнитную индукцию

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I[\vec{dl}, \vec{r}]}{r^3} \quad (2.1)$$

где μ — относительная магнитная проницаемость среды ≈ 1 ;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ — магнитная постоянная; $\vec{r}$ — радиус-вектор, проведенный от $\vec{dl}$ в точку O .

Векторы $d\vec{B}$ от всех элементов $\vec{dl}$ перпендикулярны плоскости, в которой расположен проводник, и направлены одинаково (см. рис. 3). Значит модуль магнитной индукции B , создаваемой всем круговым проводником, равен интегралу по замкнутому контуру L модулей всех элементарных индукций dB :

$$B = \int_L dB = \int \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I dl \sin \beta}{r^2} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I \sin \beta}{r^2} \int_0^{2\pi} dl. \quad (2.2)$$

Угол β между $\vec{dl}$ и $\vec{r}$ равен $\pi/2$ (как угол между элементом окружности и ее радиусом), $L = 2\pi r$, поэтому после интегрирования получим:

$$B = \mu\mu_0 \frac{I}{2r}. \quad (2.3)$$

Вектор $\vec{B}$ имеет то же направление, что и вектор $[\vec{dl}, \vec{r}]$. Направление $\vec{B}$ определяют и по правилу буравчика для кругового тока: если направление вращения рукоятки буравчика совпадает с направлением тока, то поступательное движение буравчика даст направление вектора $\vec{B}$.

Если круговой проводник состоит из N витков, по каждому из которых протекает ток силы I , то, очевидно, магнитная индукция будет в N раз больше:

$$B = \mu\mu_0 \frac{NI}{2r}. \quad (2.4)$$

Другим способом магнитное поле в центре катушки, содержащей N витков можно рассчитать как поле «короткого» соленоида в котором длина сравнима с диаметром. Будем считать магнитную проницаемость среды $\mu = 1$. Для вычисления поля на оси короткого соленоида воспользуемся выражением поля на оси витка с током, принимая во внимание симметричность поля относительно оси. Индукция магнитного поля направлена вдоль оси кольца. Если R — радиус кольца, r — расстояние от точек кольца до некоторой точки на оси, то индукция магнитного поля определяется по формуле:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2} \cdot \frac{R^2}{r^{3/2}}, \quad (2.5)$$

Рассмотрим короткую катушку (соленоид), содержащую N витков и имеющую длину, сравнимую с поперечными размерами соленоида (R — радиус витков). Выберем ось Z вдоль оси соленоида. Выделим кольцевой элемент с током $Indl$, как показано на рис.2.5.

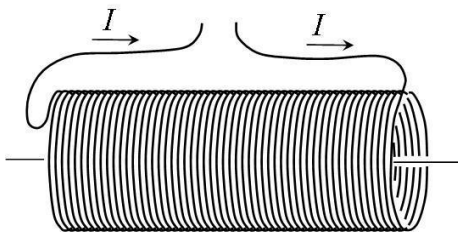


Рис. 2.4.

Тогда магнитная индукция dB_z , в произвольной точке определится по формуле:

$$dB_z = \frac{\mu_0 Indl}{2} \cdot \frac{R^2}{r^{3/2}}, \quad (2.6)$$

где $n=N/l$ — число витков на единицу длины соленоида.

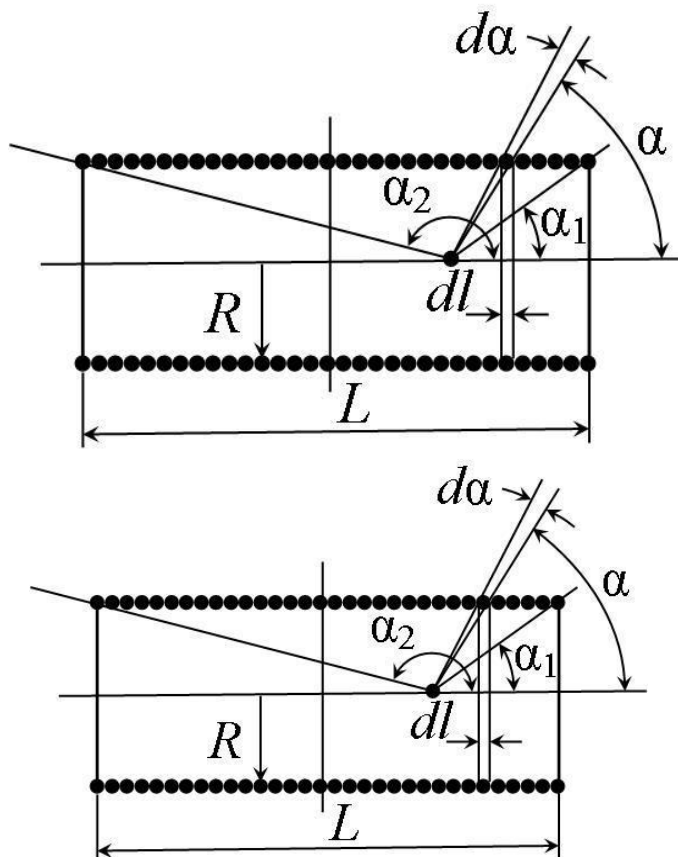


Рис. 2.5.

Интегрируя это выражение в пределах от α_1 до α_2 — углов, под которыми видны края соленоида из выбранной точки на оси соленоида, в которой определяется индукция магнитного поля:

$$B_z = \frac{\mu_0 I n}{2} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \sin \alpha \, d\alpha = \frac{\mu_0 I n}{2} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2). \quad (2.7)$$

В центре соленоида, вследствие симметрии, $\cos \alpha_1 = -\cos \alpha_2$,

$$\cos \alpha_1 = \frac{l}{2r} = \frac{l}{2R \sqrt{1 + \frac{l^2}{4R^2}}}. \quad (2.8)$$

Полученное выражение приобретает вид:

$$B_z = \mu_0 I n \cos \alpha_1. \quad (2.9)$$

В экспериментальной установке соленоид имеет размеры : $l = 3,5$ см, $R = 14$ см, тогда $\cos \alpha_1 = l / (2R \cdot 1,008)$. При сравнении с формулой (2.4) получаем, что различие в значениях индукции, вычисленной по формуле короткого соленоида, составляет 0,8%.

Из формулы (2.9) получаем выражение для магнитной индукции на оси бесконечного ($l \gg R$) соленоида:

$$B_z = \mu_0 I n, \quad (2.10)$$

а также оценить, при каком соотношении длины и диаметра можно использовать формулу (2.10) и считать соленоид «бесконечным».

Итак. на магнитную стрелку в центре кругового проводника с током будут действовать силы двух полей: магнитного поля Земли ($\vec{B}_Г$) и магнитного поля тока ($\vec{B}$). Векторы $\vec{B}_Г$ и $\vec{B}$ взаимно перпендикулярны (рис. 2.3). Стрелка установится по направлению равнодействующей векторов $\vec{B}_Г$ и $\vec{B}$, отклонившись на угол α от положения, которое она занимала до включения тока. Из рис. 2.3 следует:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{B}{B_Г}, \quad (2.11)$$

откуда после подстановки значения B из формулы (4.4) получим:

$$B_Г = \frac{\mu_0 N I}{2r \operatorname{tg} \alpha}. \quad (2.12)$$

Зная N , I , α , r , по формуле (4.12) можно вычислить горизонтальную составляющую индукции магнитного поля Земли.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Приборы и принадлежности: тангенс-гальванометр, амперметр, источник питания, реостат, переключатель, магнитная стрелка.

В экспериментальной части работы с помощью установки, схема которой изображена на рис. 2.4, определяется горизонтальная составляющая индукции магнитного поля Земли.

На рис. 2.6 круговой проводник K через переключатель S , позволяющий изменять направление тока в нем, соединен с источником питания ε . Амперметр A и реостат R предназначены для измерения и изменения силы тока в цепи. В центре кругового проводника в горизонтальной плоскости расположена магнитная стрелка C , которая

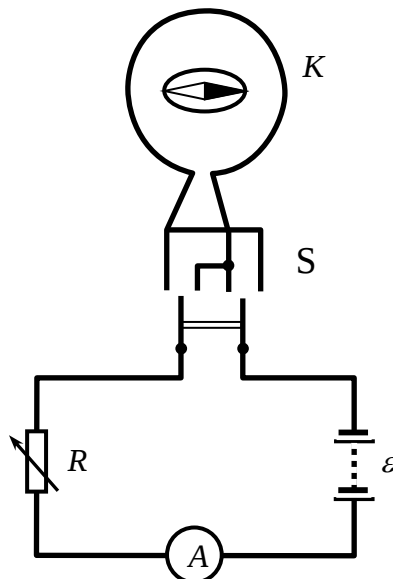


Рис. 2.6.

может вращаться вокруг вертикальной оси.

Перед выполнением эксперимента следует подготовить таблицу для занесения результатов наблюдений:

$r = \dots \text{м}, N = \dots$

Таблица 2.4

Номер опыта	$I, \text{А}$	$\alpha_1, ^\circ$	$\alpha_2, ^\circ$	$\alpha'_1, ^\circ$	$\alpha'_2, ^\circ$	$\langle \alpha \rangle, ^\circ$	$B, \text{Тл}$
1							
2							
3							

Работа выполняется в следующем порядке:

1. Проверить схему подключения тангенс-гальванометра. Обратив внимание на то, чтобы реостат R был введен в цепь полностью, а переключатель S находился в нейтральном положении.

2. Не включая источника питания, сориентировать тангенс-гальванометр (поворотом вокруг вертикальной оси) так, чтобы прямая, соединяющая концы магнитной стрелки, располагалась в плоскости кругового проводника. Вращая шкалу для отсчета углов, подвести ее нулевые штрихи под концы стрелки.

3. После проверки электрической схемы преподавателем или лаборантом подключить источник питания.

4. Переключатель S перевести в положение S_1 и, постепенно выводя реостат R , увеличить силу тока до значения, при котором, угол отклонения стрелки α близок к

20°. Показания α_1 и α_2 обоих концов стрелки и соответствующее значение силы тока I записать в таблицу.

5. Изменить направление тока, переведя переключатель S в положение S_2 , и при том же показании амперметра записать в таблицу показания α'_1 и α'_2 обоих концов стрелки.

6. Выполнить операции, записанные в пунктах 4-5, увеличивая силу тока до значений, при которых угол отклонения стрелки близок к 25 и 30°.

7. Для каждой строки таблицы подсчитать среднее значение угла отклонения стрелки $\langle\alpha\rangle$ и величину горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли. B_H вычислять с точностью до трех значащих цифр по формуле (2.12), подставляя в нее $\langle\alpha\rangle$.

8. По полученным трем значениям B_H вычислить среднее значение горизонтальной составляющей $\langle B_H \rangle$ индукции магнитного поля Земли. Результат округлить до двух значащих цифр.

9. Проанализировать полученные результаты.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие составляющие и элементы у геомагнитного поля?
2. Какое направление имеют линии индукции магнитного поля Земли? Где магнитное поле Земли больше?
3. Описать устройство тангенс-гальванометра.
4. Как ориентируют тангенс-гальванометр при подготовке к измерениям (до включения электрического тока)?
5. Записать аналитическое выражение закона Био-Савара-Лапласа.
6. Привести формулу, дающую величину угла, на который отклоняется магнитная стрелка тангенс-гальванометра после включения электрического тока.
7. Записать формулу для модуля магнитной индукции, создаваемой круговым проводником с током в его центре.
8. Сформулировать правило буравчика для кругового тока.
9. В каком направлении установится магнитная стрелка в центре кругового проводника с током?
10. Какую формулу используют для вычисления горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли?
11. Для чего в схему экспериментальной установки введены реостат R и переключатель S ?
12. Вывести формулу короткого соленоида, длина которого сравнима с поперечными размерами.
13. Записать формулу бесконечного соленоида, длина которого значительно больше диаметра.
14. Рассчитать, при каком соотношении длины соленоида к его диаметру применение формулы бесконечного соленоида дает погрешность в 10% в определении индукции магнитного поля на оси по сравнению с формулой короткого соленоида.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калашников, С.Г. Электричество / С.Г. Калашников. – 6-е изд., стереот. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. - 624 с.
2. Трофимова, Т.И. Курс физики: Учебное пособие для инженерно-технических специальностей вузов/ Т.И.Трофимова.- 18-е изд., стер.- М: Академия, 2010.- 560с

3. Савельев, И.В. Курс общей физики. В 3-х т.: Учебное пособие для студ. вузов/ И.В. Савельев.- 10-е изд., стер.- СПб: Лань. - (Учебники для вузов. Специальная литература) Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика.- 2008.- 496с.

Лабораторная работа № 3

ГИСТЕРЕЗИС ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

Цель работы: изучение свойств ферромагнетиков, снятие петли гистерезиса и определение основных характеристик ферромагнетиков.

ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Магнетики — термин, применяемый к веществам при рассмотрении их магнитных свойств. При внесении в магнитное поле напряженностью $\vec{H}$ вещества могут создавать собственное магнитное поле, которое может ослаблять или усиливать внешнее поле. По этому признаку вещества классифицируются следующим образом:

- 1) **диамагнетики** — собственное поле мало и противоположно внешнему.;
- 2) **парамагнетики** — собственное поле мало и сонаправлено с внешним полем;
- 3) **ферромагнетики** — собственное поле велико и усиливает внешнее поле;
- 4) **антиферромагнетики** — создают большие поля, направленные противоположно внешнему.

Объяснение магнитных свойств вещества возможно на основе квантовой теории, однако представление о поведении вещества в магнитном поле могут дать простые модели на основе теории Бора. Количественной характеристикой намагниченного состояния вещества служит векторная величина - намагниченность $\vec{J}$.

Поскольку все вещества состоят из атомов и молекул, обладающих электронной оболочкой, то можно говорить о магнитном моменте атомов и частиц, составляющих атом.

Магнитный момент контура с током I :

$$\vec{p}_m = I \vec{S} = I S \vec{n},$$

где $\vec{n}$ — нормаль к поверхности контура, S — площадь контура с током.
Движение электрона по орбите в атоме эквивалентно току:

$$i = e \cdot \nu = \frac{e v}{2\pi r},$$

где ν — частота вращения электрона, а v — его скорость, r — радиус орбиты.
Орбитальный магнитный момент электрона по величине:

$$p_m = \frac{e v}{2\pi^2} \cdot \pi r^2 = \frac{e v r}{2}.$$

В электронных оболочках они могут быть скомпенсированы, $\sum_i \vec{p}_{mi} = 0$, или нет.

В последнем случае молекулы будут обладать магнитным моментом, представляя собой магнитные диполи. Кроме того, все частицы обладают собственным магнитным

моментом, называемый спином, который также вносит вклад в собственное магнитное поле.

Намагниченность J — суммарный магнитный момент в единице объема V :

$$\vec{J} = \frac{\sum_i \vec{p}_{mi}}{V}, \text{ имеющий размерность } [J] = A / м.$$

В отсутствие внешних полей молекулярные диполи ориентированы хаотически и $\vec{J} = 0$. При включении внешнего поля диполи выстраиваются в направлении поля так, что $\vec{J} \neq 0$, а напряженность поля:

$$\vec{H}' = \vec{H} + \vec{J},$$

При этом намагниченность в слабых полях растет пропорционально напряженности поля:

$J = \chi H$, где χ — магнитная восприимчивость, тогда

$$H' = H + \chi H = H(1 + \chi) = \mu H,$$

где $1 + \chi = \mu$ — магнитная проницаемость вещества

Индукция магнитного поля в веществе находится по формуле:

$$\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H},$$

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

Парамагнетики — вещества, молекулы которых обладают магнитным моментом. В отсутствие внешнего поля магнитные моменты ориентированы беспорядочно, намагниченность отсутствует. Под действием внешнего поля устанавливается преимущественная ориентация магнитных моментов по полю, усиливая его. Типичные парамагнетики: алюминий, марганец, многие газы (табл. 1). При внесении в магнитное поле парамагнетики втягиваются в поле, для них значения $\chi \sim 10^{-6} — 10^{-4}$, $\mu \sim 1$.

Кроме того, атом, как система подвижных зарядов, взаимодействует с магнитным полем, в результате чего возникает составляющая магнитного поля, в соответствии с правилом Ленца, направленная против причины, его вызывающей. Явление, называемое диамагнетизмом, присуще всем веществам, имеет значения $\chi < 0$, $\mu \sim 1$, проявляется у веществ, у которых отсутствуют другие проявления намагниченности (медь, олово, вода, см табл. 1). При внесении во внешнее поле диамагнетики выталкиваются из поля.

Ферромагнетики — твердые вещества, (железо, никель, кобальт, их сплавы, табл. 2, 3), создающие большую намагниченность, магнитная проницаемость μ и магнитная восприимчивость χ достигают значений нескольких тысяч, при этом зависят от приложенного поля и от температуры. Ферромагнетики в отличие от слабомагнитных диа- и парамагнетиков являются сильномагнитными средами.

Магнитные свойства ферромагнитных материалов сохраняются до тех пор, пока их температура не достигнет значения, называемого точкой Кюри. При температурах выше точки Кюри ферромагнетик ведет себя как парамагнетик, у него изменяется теплоемкость, электроемкость и другие физические характеристики. Точка Кюри для железа — 770°C , кобальта — 1130°C .

Объяснение ферромагнетизма дает квантовая механика. Явление присуще некоторому числу кристаллов, атомы которых имеют незаполненные внутренние электронные оболочки. Электроны обладают собственным магнитным моментом,

называемый **спином**. Обменное взаимодействие электронов незаполненных оболочек соседних атомов упорядочивает их спины параллельно в одном направлении, появляется намагниченность. В ненамагниченном ферромагнетике имеются микроскопические области, самопроизвольно намагниченные до насыщения, которые называются **доменами**. Обменное взаимодействие – проявление волновых свойств электронов, имеет электростатическую природу. Равновесная доменная структура обладает минимальной энергией. В ненамагниченном состоянии области могут быть малы, и ориентация их магнитных моментов произвольная, суммарный магнитный момент равен нулю, что соответствует минимуму энергии. При увеличении внешнего поля энергетически выгодные домены растут за счет невыгодных, далеких от направления внешнего поля. Эти изменения могут быть обратимы в слабых полях. Далее происходит необратимое изменение границ и дальнейшая ориентация доменов вдоль поля до точки насыщения J_m , где намагниченность максимальна и не увеличивается более с ростом поля. Зависимость намагниченности от напряженности внешнего поля называется **основной кривой намагничивания**. Индукция поля в ферромагнетике имеет такой же характер зависимости, в результате намагничивания достигая значения насыщения $B_{нас}$, см рис 5.1.

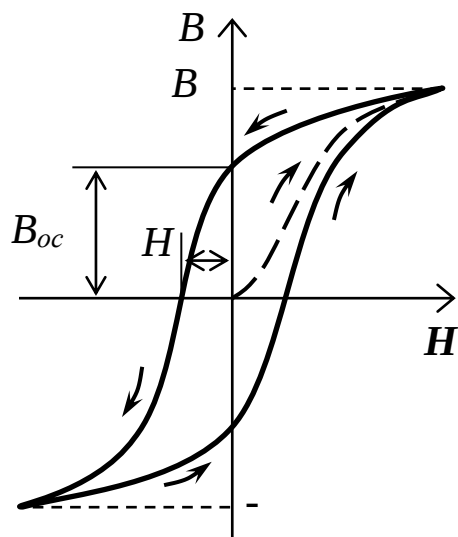


Рис. 3.1.

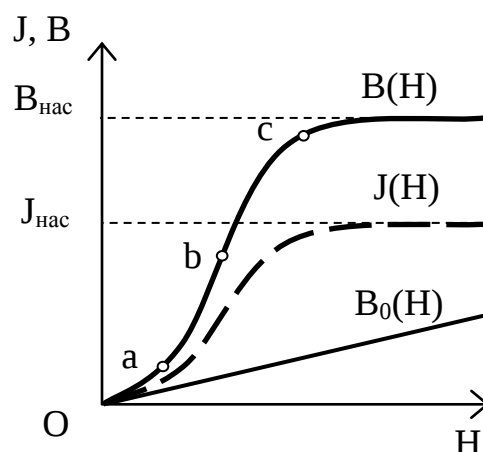


Рис. 3.2.

В ходе процесса образец испытывает механические напряжения и даже изменение размеров, затрачивая энергию. Если теперь уменьшать напряженность поля, кривая изменения индукции пойдет выше кривой начального намагничивания, уменьшаясь до некоторого значения. В отсутствие внешнего поля ($H = 0$) намагниченность, а значит, и магнитная индукция B , оказываются отличны от нуля, принимают значения $J = J_r$, $B = B_r$, которые называются **остаточной** намагниченностью и **остаточной** индукцией. Чтобы размагнитить образец, намагниченный до насыщения, надо приложить обратное поле напряженностью H_c , при котором $B = 0$. Величина H_c называется **коэрцитивной силой**. Далее процесс намагничивания повторяется, в противоположном направлении до насыщения, магнитная индукция принимает значение $B = -B_r$. Можно провести его в обратном направлении, получить замкнутую кривую $B = f(H)$, которая называется **петлей гистерезиса**, (рис. 5.2), а значения B_m , B_r , H_c — **характеристики** петли гистерезиса. Площадь, охватываемая этой кривой, дает энергию потерь на

перемагничивание в единице объёма магнетика. Таким образом, магнитная индукция в ферромагнетике зависит не только от напряженности поля, но и от предшествующего состояния ферромагнетика. Это явление называется *гистерезисом*. Магнитная проницаемость также меняется при намагничивании, достигая максимума μ_{max} при некотором значении H и несколько спадая к точке насыщения, как показано на рис.3.3. Величина:

$$\mu_m = \frac{B_m}{\mu_0 H_m} \quad (3.1)$$

— предельная магнитная проницаемость материала.

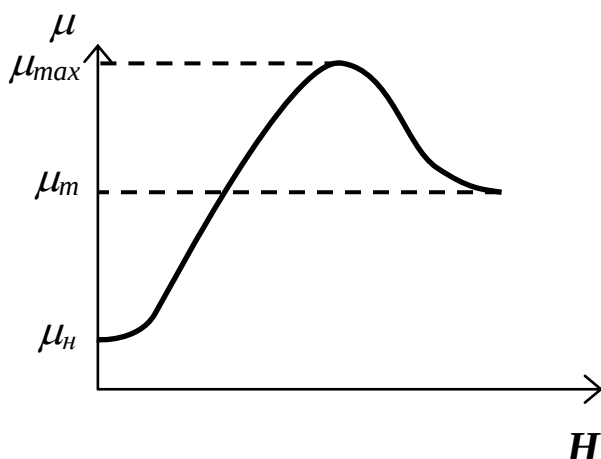


Рис. 3.3.

В зависимости от формы петли гистерезиса различают *магнитожесткие* и *магнитомягкие* материалы. Большинство магнитных материалов используются либо для изготовления сердечников трансформаторов, либо постоянных магнитов. Для сердечников трансформаторов используются магнитомягкие материалы, обладающие большой проницаемостью, что позволяет в слабых полях достигать насыщения. Эти материалы характеризуются петлей гистерезиса с малой площадью, поэтому малы потери на перемагничивание. Чистое железо не отвечает вполне этим требованиям, поэтому к железу добавляют различные примеси или используют сплавы с никелем.

Постоянные магниты должны создавать сильные поля в зазоре, поэтому для их изготовления используют материалы с высокой намагниченностью насыщения, большой остаточной намагниченностью и большой коэрцитивной силой. Петля гистерезиса имеет большую площадь и большую энергию перемагничивания. Магниты из этих материалов труднее размагнитить. Эти свойства материалов достигаются созданием сплавов железа с вольфрамом и хромом, а также использованием твердой стали. Сравнительные данные приведены в табл.3.3.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Приборы и принадлежности: электронный блок с ферромагнитным образцом, осциллограф.

В экспериментальной части работы с помощью электронного блока, схема которого изображена на рис. 4, на экране осциллографа получают зависимость индукции B от напряженности H для исследуемого образца, который представляет собой сердечник

тороидальной катушки. На сердечнике размещены две катушки. Первичная обмотка питается от сети переменного напряжения 220 В через автотрансформатор. Ток силы I_1 первичной обмотки, на единицу длины которой приходится n_1 витков, создает внутри нее поле напряженностью $H = I_1 n_1$, а на сопротивлении R_1 — напряжение u_x ; $u_x = I_1 R_1$. Напряжение подается на горизонтальные пластины осциллографа. Подставляя $I_1 = H / n_1$ в формулу для u_x , получим

$$u_x = \frac{R_1}{n_1} H, \quad (3.2)$$

то есть u_x пропорционально H .

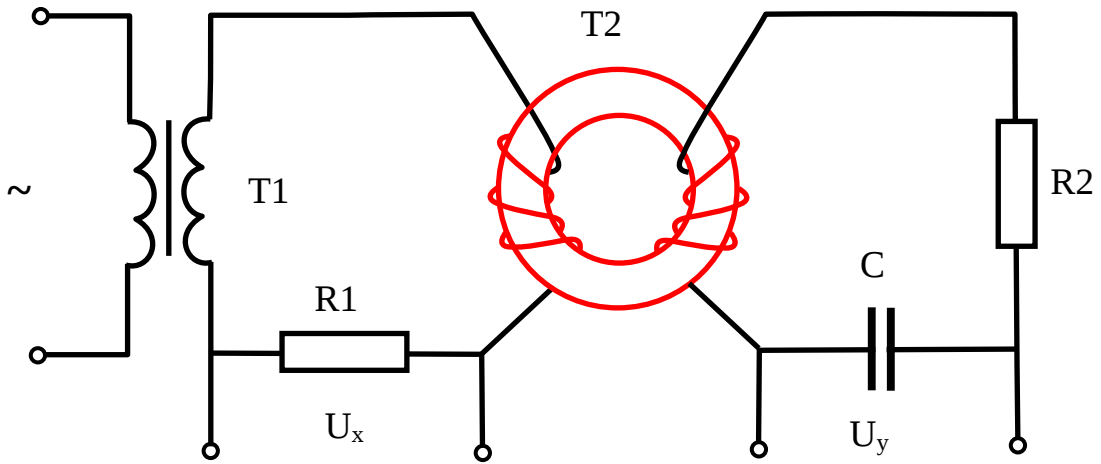


Рис. 3.4.

На пластины вертикального отклонения осциллографа подается напряжение на конденсаторе $u_y = q / C$, где q и C — соответственно, заряд и емкость конденсатора; u_y входит в закон Ома для участка, включающего всю цепь вторичной обмотки трансформатора T_2 кроме промежутка между обкладками конденсатора:

$$I_2 = \frac{u_y + E_C + E_{21}}{R},$$

где I_2 — сила тока, E_C и E_{21} — ЭДС самоиндукции и взаимной индукции во вторичной обмотке, R — сопротивление всего участка. Параметры трансформатора T_2 и конденсатора подобраны так, что $|u_y + E_C| \ll |E_{21}|$ поэтому

$$I_2 = \frac{E_{21}}{R}. \quad (3.3)$$

Согласно закону Фарадея

$$E_{21} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(NBS) = -NS \frac{dB}{dt},$$

где N , S — соответственно, число витков и площадь, охватываемая одним витком вторичной обмотки трансформатора; B — магнитная индукция, создаваемая током первичной обмотки. Сила тока

$$I_2 = -\frac{dq}{dt} = -\frac{C}{C} \frac{dq}{dt} = -C \frac{d}{dt} \left(\frac{q}{C} \right) = -\frac{du_y}{dt} C$$

(знак минус поставлен потому, что положительным считаем ток, разряжающий конденсатор).

Подставляя E_{21} и I_2 в формулу 1 получим:

$$C \frac{du_y}{dt} = -\frac{NS}{R} \frac{dB}{dt}.$$

Следовательно

$$u_y = \frac{NS}{RC} B, \quad (3.4)$$

то есть u_y пропорциональна B .

Таким образом, на пластины вертикального отклонения осциллографа подается напряжение u_y , пропорциональное магнитной индукции B , а на пластины горизонтального отклонения — напряжение u_x , пропорциональное напряженности H .

В результате на экране осциллографа возникает кривая, воспроизводящая в некотором масштабе зависимость B от H — петлю гистерезиса, изображенную на рис. 5.2.

Если при напряжении u_x и u_y луч осциллографа смещается вдоль оси абсцисс и ординат на одно деление, то $u_x = x u_x$ и $u_y = y u_y$. С учетом этого из соотношений 2 и 4 найдем

$$H = K_x x; B = K_y y, \quad (3.5)$$

где $K_x = n_1 u_x / R_1$ и $K_y = C R u_y / NS$ — коэффициенты, постоянные для данной установки.

Перед выполнением эксперимента следует подготовить таблицу для занесения результатов наблюдений:

Таблица 3.1

x , мм	y , мм	H , А/м	B , Тл

1. Ознакомиться с электрической схемой и после ее проверки преподавателем или лаборантом включить осциллограф и электронный блок в сеть.

2. На передней панели осциллографа поставить ручку «Усиление» на оси «у» в положение «9», ручку «Усиление» по оси «х» — в положение «8», тем самым достигаются определенные значения коэффициентов K_x и K_y , указанных на установке.

3. Вращением ручки лабораторного трансформатора на электронном блоке добиться на экране осциллографа изображения петли, координаты вершин которой приблизительно равны (40, 40) и (-40, -40).

4. Переснять петлю на кальку и провести через вершины петли вертикальные и горизонтальные линии. Центр полученного прямоугольника принять за начало системы координат.

5. С точностью до 0.5 мм провести отсчет координат точек пересечения петли с осями «х» и «у» для определения остаточной индукции B и коэрцитивной силы H_c . Полученные данные занести в таблицу.

6. Определить с точностью до 0.5 мм координаты «х» и «у» вершины петли, находящейся в первом квадранте графика. Результаты занести в таблицу.

7. По данным «х», «у», K_x и K_y вычислить H и B , соответственно, в А/м и Тл, результаты занести в таблицу.

8. По полученным данным рассчитать остаточную намагниченность, используя формулу 5.5 при $H = 0$, результаты занести в таблицу.

9. Вычислить магнитную проницаемость μ , соответствующую значениям H и B вершины петли по формуле 1.

10. Перенести изображение петли гистерезиса на миллиметровую бумагу и подсчитать по клеткам площадь S_f петли гистерезиса в мм^2 . Вычислить энергию потерь в единице объема на перемагничивание образца по формуле:

$$W = k_x k_y S_f, \text{ где } k_x, k_y - \text{масштабные коэффициенты.}$$

11. Оценить точность полученных результатов.

Таблица 3.2. Магнитные восприимчивости пара- и диамагнетиков

Парамагнетики	$\mu - 1, 10^{-8}$	Диамагнетики	$\mu - 1, 10^{-8}$
Азот	0,013	Водород	-0,063
Воздух	0,38	Бензол	-7,5
Кислород	1,9	Вода	-9,0
Эбонит	14	Медь	-10,3
Алюминий	23	Стекло	-12,6
Вольфрам	176	Каменная соль	-12,6
Платина	360	Кварц	-15,1
Жидкий кислород	3400	Висмут	-176

Таблица 3.3. Магнитные свойства некоторых магнито-мягких материалов

Ферромагнетик	$B_{max}, \text{Тл}$	μ_H	μ_{max}	$H_c, \text{А/м}$	Свойства
Альсифер	1,1	20000	117000	1,8	Отличается механической твердостью и хрупкостью. Обладает малой коэрцитивной силой и высокими значениями магнитных проницаемостей. Удельное эл. сопротивление 0,6 мкОм·м. Идет на изготовление магнитопроводов корпусов приборов.
Пермаллои высоко-никелевые	0,70-0,75	14000-50000	60000-300000	0,8-4,8	Сплав, обладающий, высокой магнитной проницаемостью и небольшой коэрцитивной силой. Применяется для изготовления сердечников слаботочных трансформаторов звукового диапазона, дросселей и т.д.
Электротехническая сталь	2	200-600	3000-8000	9,6-64,0	Сталь электротехническая (трансформаторная) используется для изготовления сердечников трансформаторов, дросселей, эл. машин и т.д.
Ферриты	0,18-	100-	3000-10000	8-120	

никель-цинковые и марганец-цинковые	0,40	6000			
Железо (технически чистое, мин. кол-во примесей)	2,16	250	7000	64	
Магнитопроводы ГАММАМЕТ® 412А	1,12		600 000	1,21	Область применения: магнитные усилители, импульсные трансформаторы, дроссели насыщения, магнитные ключи. Температура Кюри 610 °С Плотность: 7400 кг/м ³ Удельное электросопротивление: 1,25·10 ⁻⁶ Ом·

Таблица 3.4. Магнитные свойства некоторых магнитотвердых материалов.

Ферромагнетик	H_c , А/м	B_r , Тл	ω_{max} , Дж/м ³	Свойства
Альни-3	40000	0,5	7200	Сплавы обладают большими значениями коэрцитивной силы и, остаточной индукцией. Плотность 6900 кг/м ³ (альни) и 7100 кг/м ³ (альнико). Применяются для изготовления литых, постоянных магнитов.
Альнико-15	48000	0,75	12000	
Альнико-18	52000	0,90	19400	
Магнико	40000	1,23	32250	Высококоэрцитивный сплав, плотностью 7000кг/м ³ . Сплав используется для изготовления постоянных магнитов. Магниты из магнико при равномерной магнитной энергии в 4 раза

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дать определение магнитного момента.
2. Что такое намагниченность?
3. Что такое магнитная восприимчивость?
4. Что такое магнитная проницаемость?
5. Как классифицируются магнетики?
6. Как зависит намагниченность от внешнего поля?
7. Что такое точка Кюри?
8. Как получается петля гистерезиса?

9. Перечислить характеристики петли гистерезиса.
10. Привести примеры пара – и диамагнетиков, указать их характеристики.
11. Чем отличаются ферромагнетики от других магнетиков?
12. Дать выражение для орбитального момента электрона.
13. Где применяются магнитомягкие материалы и почему?
14. Где применяются магнитомягкие материалы и почему?
15. Как отличить парамагнетик от диамагнетика?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калашников, С.Г. Электричество / С.Г. Калашников. – 6-е изд., стереот. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. - 624 с.
2. Трофимова, Т.И. Курс физики: Учебное пособие для инженерно-технических специальностей вузов/ Т.И.Трофимова.- 18-е изд., стер..- М: Академия, 2010.- 560с
3. Савельев, И.В. Курс общей физики.В 3-х т.: Учебное пособие для студ.вузов/ И.В.Савельев.- 10-е изд.,стер..- СПб: Лань. - (Учебники для вузов. Специальная литература) Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика.- 2008.- 496с.

Лабораторная работа № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ СОЛЕНОИДА

Цель работы: изучить явление электромагнитной индукции и экспериментально определить индуктивность соленоида.

ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

В 1831 г. Фарадей обнаружил, что во всяком замкнутом проводящем контуре при изменении потока магнитной индукции через поверхность, ограниченную этим контуром, возникает электрический ток. Это явление называется *электромагнитной индукцией*, а возникающий при этом ток – индукционный.

Явление электромагнитной индукции заключается в том, что *при изменениях магнитного потока в контуре возникает электродвижущая сила индукции (ЭДС индукции) $\mathcal{E}_i$* . Величина $\mathcal{E}_i$ численно равна скорости изменения магнитного потока Φ через поверхность, ограниченную контуром:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (4.1)$$

Это формулировка *закона Фарадея*.

Так как магнитный поток для однородного магнитного поля равен

$$\Phi = BS \cos \varphi,$$

где B - индукция магнитного поля, S - площадь контура, φ - угол между нормалью, проведенной к контуру и вектором магнитной индукции то ЭДС индукции равна

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(BS \cos \varphi)}{dt}. \quad (4.2)$$

Таким образом, ЭДС индукции может возникать как в результате изменения магнитной индукции B во времени или площади контура S , так и за счет вращения контура в однородном магнитном поле, то есть при изменении S и φ .

Знак «минус» в формуле (4.1) определяет направление индукционного тока в контуре. Согласно **правилу Ленца индукционный ток направлен так, что создаваемый им собственный магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром, компенсирует то изменение магнитного потока, которое его вызывает.**

Пусть контур, в котором индуцируется ЭДС, состоит не из одного витка, а из N витков, например, представляет собой соленоид.

Соленоидом называют катушку цилиндрической формы из проволоки, витки которой намотаны в одном направлении (рис. 4.1). Магнитное поле соленоида представляет собой результат сложения полей, создаваемых несколькими круговыми токами, расположенными рядом и имеющим общую ось. На рис. 4.1 показано, что внутри соленоида силовые линии каждого отдельного витка имеют одинаковое направление, тогда как между соседними витками они имеют противоположные направления. Поэтому при достаточно плотной намотке соленоида противоположно направленные участки силовых линий соседних витков взаимно уничтожаются, а одинаково направленные участки сольются в общую замкнутую линию, проходящую внутри всего соленоида и охватывающего его снаружи.

Магнитное поле **длинного соленоида** изображено на рис. 4.2. Внутри соленоида поле оказывается практически **однородным**, вне соленоида – неоднородным и сравнительно слабым (густота силовых линий здесь весьма мала).

Напряженность H магнитного поля соленоида рассчитывается по формуле

$$H = \frac{I \cdot n}{l},$$

где l – длина соленоида, n – число его витков, I – сила тока в нём. Произведение $I \cdot n$ принято называть **числом ампер – витков**.

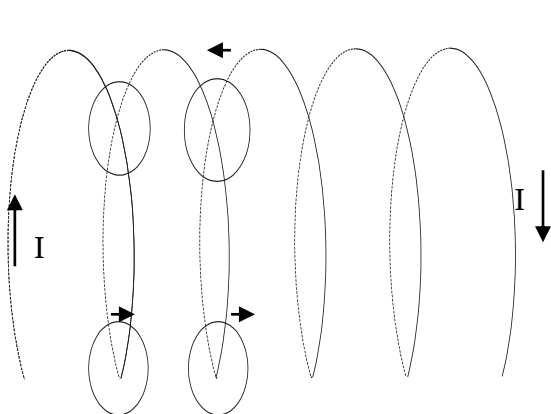


Рис. 4.1

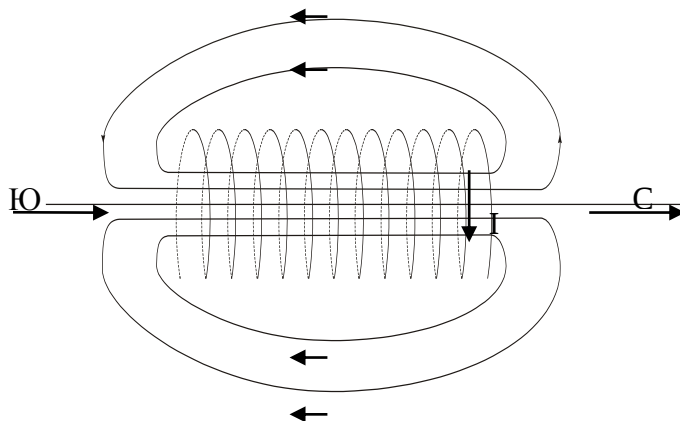


Рис. 4.2

Поскольку витки в соленоиде соединяются последовательно, ЭДС индукции $\mathcal{E}_i$ будет равна сумме ЭДС, индуцируемых в каждом из витков в отдельности:

$$\mathcal{E}_i = -\sum \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(\sum \Phi) \quad (4.3)$$

Величину $\Psi = \sum \Phi$ называют **потокосцеплением** или **полным магнитным потоком**. Ее измеряют в тех же единицах, что и магнитный поток $[\Psi] = \text{Вб}$ (Вебер).

Если поток, пронизывающий каждый из витков, одинаков,

$$\Psi = N\Phi. \quad (4.4)$$

ЭДС, индуцируемая в сложном контуре, определяется формулой:

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Psi}{dt} \quad (4.5)$$

Рассмотрим произвольный замкнутый контур, по которому течет ток силы I . Этот ток создает вокруг себя магнитное поле, так что поверхность, ограниченную контуром, пронизывает полный магнитный поток Ψ . Величина Ψ пропорциональна силе тока I :

$$\Psi = LI \quad (4.6)$$

Коэффициент пропорциональности L между магнитным потоком Ψ и силой тока I называется индуктивностью контура. Полагая в формуле (6.6) силу тока равной единице, видим, что индуктивность численно равна магнитному потоку, пронизывающему поверхность контура, по которому течет ток единичной силы. За **единицу индуктивности в СИ** принимается *индуктивность такого контура, поверхность которого пронизывается магнитным потоком в 1 Вб при силе тока в нем 1 А*. Эту единицу называют **Генри (Гн)**.

Индуктивность зависит от геометрии контура: его формы и размеров, а также от магнитной проницаемости среды, в которой контур находится.

Для соленоида, длина которого значительно превышает поперечные размеры,

$$L = \mu_0 \mu n^2 V, \quad (4.7)$$

где $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$ Гн/м - магнитная постоянная; $n = \frac{N}{l}$ - число витков на единицу

длины, $V = Sl$ - объем соленоида. Тогда индуктивность можно определить по формуле:

$$L = \mu_0 \mu \frac{N^2}{l} S. \quad (4.8)$$

При изменении силы тока I изменится также и величина Ψ , вследствие чего в контуре возникнет ЭДС индукции. **Появление ЭДС индукции в контуре за счет изменения в нем тока называется самоиндукцией**. Закон Фарадея (4.5) с учетом соотношения (4.6) имеет вид:

$$\varepsilon_s = - \frac{d(LI)}{dt} = - \left(L \frac{dI}{dt} + I \frac{dL}{dt} \right)$$

и определяет ЭДС самоиндукции. Знак «минус» в этой формуле обусловлен **правилом Ленца**, согласно которому индукционный ток направлен так, чтобы противодействовать причине, его вызывающей. Если при изменении силы тока индуктивность остается постоянной, что возможно лишь при отсутствии ферромагнетиков, выражение для ЭДС самоиндукции имеет вид:

$$\varepsilon_s = -L \frac{dI}{dt} \quad (4.9)$$

и выражает зависимость ЭДС самоиндукции от быстроты изменения силы тока.

Явление электромагнитной индукции широко используется в многочисленных технических устройствах и приборах. Например, в трансформаторах – устройствах для

понижения или повышения переменного напряжения; в детекторах металла. Генерирование переменного тока происходит при вращении рамки в постоянном магнитном поле. Явление электромагнитной индукции позволяет считывать видео- и аудиоинформацию с магнитных лент. Индукционные токи, возникающие в проводниках (токи Фуко), используются для их нагрева, что используется в электропечах для плавки металлов и в бытовых микроволновых СВЧ-печах.

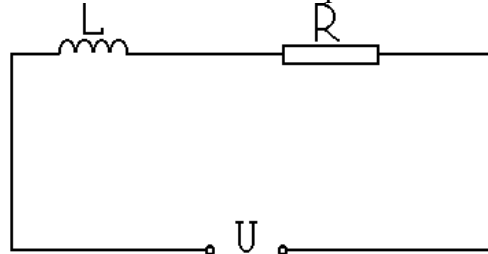


Рис. 4.3.

Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из соленоида с индуктивностью L и сопротивлением R , которое для наглядности представлено на схеме отдельным элементом и источника напряжения U (рис. 6.3). При замыкании цепи сила тока в течение некоторого промежутка времени (время включения) нарастает от нуля до установившегося значения I . Нарастание силы тока в соленоиде согласно (8) приведет к возникновению ЭДС самоиндукции. Очевидно, что в процессе нарастания тока источник напряжения должен совершить работу против ЭДС самоиндукции. Эта работа целиком идет на создание в соленоиде магнитного поля с энергией:

$$W = \frac{LI^2}{2}. \quad (4.10)$$

При постоянном напряжении источника $U = U_0$ сила тока, установившегося в цепи, также постоянна и согласно закону Ома равна

$$I_0 = \frac{U_0}{R}. \quad (4.11)$$

Если напряжение меняется по гармоническому закону

$$U = U_m \cos \omega t, \quad (4.12)$$

то в цепи возникает переменный ток

$$I = I_m \cos\left(\omega t - \arctg \frac{\omega L}{R}\right). \quad (4.13)$$

Сравнивая выражения (4.12) и (4.13) мы видим, что напряжение и ток сдвинуты по фазе на угол $\varphi = \arctg \frac{\omega L}{R}$ и, следовательно, не одновременно принимают наибольшие, наименьшие и нулевые значения. Наибольшее значение сдвига фаз φ между напряжением и током достигается при $R \ll \omega L$ и составляет $\varphi = \frac{\pi}{2}$. В этом случае ток отстает от напряжения на четверть периода.

Амплитуда тока I_m определяется амплитудой и частотой переменного напряжения, индуктивностью и сопротивлением соленоида:

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}. \quad (4.14)$$

Соотношение (6.14) представляет собой закон Ома для цепи переменного тока с индуктивностью L и активным сопротивлением R . Если $\omega = 0$, то в цепи течет постоянный ток и формула (6.14) превращается (6.11). Величина

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad (4.15)$$

называется **полным сопротивлением соленоида переменному току**.

Пользуясь формулой (6.14) выразим индуктивность соленоида:

$$L = \frac{\sqrt{Z^2 - R^2}}{\omega}. \quad (4.16)$$

Выражение (6.16) используется в настоящей работе для экспериментального определения индуктивности соленоида.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Экспериментальная установка (рис. 4.4) содержит два источника тока – постоянного и переменного напряжения. Регулировка напряжения осуществляется потенциометром r , а измерения сил токов I_0, I_m и напряжений на соленоиде U_0, U_m - амперметром и вольтметром. В практической схеме предусмотрены также непоказанные на рисунке элементы, позволяющие одним и тем же прибором измерять характеристики постоянного и переменного тока.

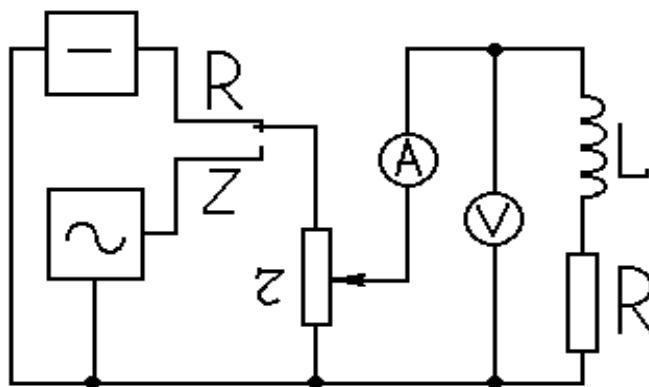


Рис. 4.4.

Перед выполнением работы следует подготовить таблицу 4.1 для занесения результатов измерений.

Таблица 4.1

Номер измере	Постоянный ток	Переменный ток (соленоид без сердечника)	Переменный ток (соленоид с сердечником)
-----------------	----------------	--	---

ния	U_0 , дел	U_0 , В	I_0 , мА	R , Ом	U_m , дел	U_m , В	I_m , мА	$Ом$	U_m , дел	U_m , В	I_m , мА	Z_μ , Ом
1		0,5				0,5				0,5		
2		0,6				0,55				0,55		
3		0,7				0,6				0,6		
4		0,8				0,65				0,65		
5		0,9				0,7				0,7		
среднее R , Ом					среднее Z , Ом				среднее Z_μ , Ом			

1. Включить установку в сеть.
2. Установить переключатель "R-Z" в положение "R", что соответствует подключению источника постоянного тока.
3. Перевести напряжение, указанное в таблице в вольтах, в деления с помощью градуировочного графика (рис.4.5). Вращением ручки потенциометра установить напряжения в делениях, указанные в таблице.
4. Занести значения измеренной силы тока в соответствующие графы таблицы.
5. Установив переключатель "R-Z" в положение "Z", что соответствует подключению источника переменного тока, повторить пункты 3-4. Предварительно убедиться, что сердечник выведен из соленоида.
6. Оставляя переключатель в положении "Z", ввести в соленоид сердечник с помощью ручки на правой панели прибора и повторить пункты 3-4.
7. По результатам каждого измерения U_0, I_0 вычислить величину активного сопротивления соленоида по формуле $R = \frac{U_0}{I_0}$. Рассчитать среднее значение.

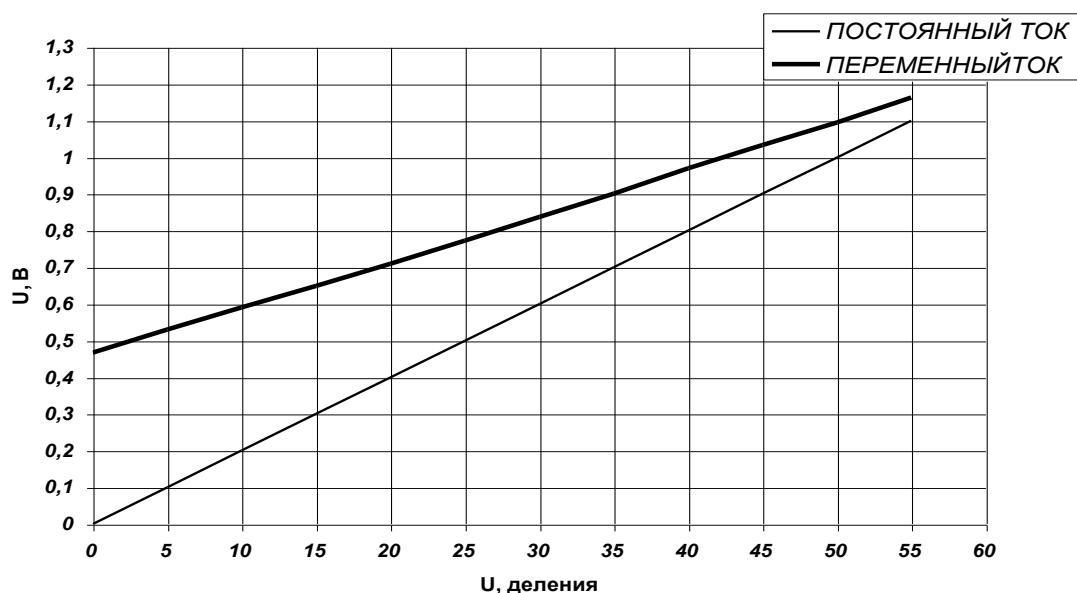


Рис.4.5. Градуировочный график

8. По результатам каждого измерения U_m, I_m вычислить величину полного сопротивления соленоида по формуле $Z = \frac{U_m}{I_m}$ без сердечника (Z) и с сердечником (Z_μ). Рассчитать средние значения Z и Z_μ .
9. Подставляя найденные значения параметров в формулу (4.16) вычислить индуктивность соленоида без сердечника L и с сердечником L_μ . Считать $\omega = 314$ Гц.
10. Оценить точность полученных результатов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается явление электромагнитной индукции?
2. Сформулируйте закон Фарадея для электромагнитной индукции и запишите его аналитическое выражение.
3. Сформулируйте правило Ленца.
4. Что представляет собой соленоид?
5. Сформулируйте определение индуктивности.
6. От чего зависит индуктивность соленоида?
7. Что представляет собой единица индуктивности в СИ?
8. В чем состоит явление самоиндукции?
9. Запишите формулу для энергии магнитного поля.
10. От чего зависит амплитуда и фаза переменного тока?
11. Какая величина называется полным электрическим сопротивлением соленоида?
12. Должна ли измениться индуктивность соленоида, если в него ввести металлический сердечник? Ответ поясните.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калашников, С.Г. Электричество / С.Г. Калашников. – 6-е изд., стереот. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. - 624 с.
2. Трофимова, Т.И. Курс физики: Учебное пособие для инженерно-технических специальностей вузов/ Т.И.Трофимова.- 18-е изд., стер.- М: Академия, 2010.- 560с
3. Савельев, И.В. Курс общей физики. В 3-х т.: Учебное пособие для студ.вузов/ И.В.Савельев.- 10-е изд.,стер.- СПб: Лань. - (Учебники для вузов. Специальная литература) Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика.- 2008.- 496с.

Лабораторная работа № 5

ИЗУЧЕНИЕ ЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ В КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ

Цель работы: изучить теорию затухающих колебаний в колебательном контуре и определить из эксперимента их характеристики.

ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Колебательный контур представляет собой электрическую цепь из последовательно соединенных конденсатора емкостью C , катушки индуктивности L , резистора с сопротивлением R , ключа S (рис.5.1).

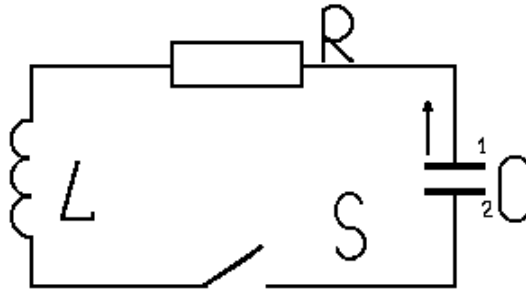


Рис.5.1

Сообщим обкладке 1 конденсатора C заряд положительный заряд $+q$, на второй обкладке возникнет индуцированный заряд $-q$, между обкладками 1 и 2 появляется напряжение $U = \frac{q}{C}$. Затем конденсатор начнет разряжаться, в контуре возникнет электрический ток i , изменяющийся с о временем t . Заряд конденсатора в произвольный момент времени равен q , ток в катушке индуктивности равен i . Конденсатор периодически перезаряжается и в контуре происходят периодические электромагнитные колебания. Эти колебания затухают со временем вследствие ухода тепловой энергии выделяющейся на сопротивлении R , при прохождении электрического тока.

Полная энергия электрического колебательного контура равна сумме электрической энергии заряженного конденсатора, равной $\frac{q^2}{2C}$ и энергии магнитного поля катушки индуктивности, равной $\frac{Li^2}{2}$. За время dt из колебательного контура уходит энергия в виде теплоты равная по закону Джоуля –Ленца $i^2 Rdt$. Поэтому уменьшение энергии колебательного контура равно ушедшей из контура энергии:

$$-d\left(\frac{q^2}{2C} + \frac{Li^2}{2}\right) = i^2 Rdt. \quad (5.1)$$

Разделив это уравнение на dt , получим:

$$-\frac{d}{dt}\left(\frac{q^2}{2C} + \frac{Li^2}{2}\right) = i^2 R.$$

Возьмем производную по времени от выражения в скобках:

$$-\frac{q}{C} \frac{dq}{dt} - Li \frac{di}{dt} = i^2 R.$$

Разделим уравнение на силу тока $i = \frac{dq}{dt}$ и преобразовав получаем:

$$L \frac{di}{dt} + \frac{q}{C} + iR = 0.$$

Так как сила тока $i = \frac{dq}{dt}$, а производная по времени $\frac{di}{dt} = \frac{d^2q}{dt^2}$, то, разделив на L , получим дифференциальное уравнение затухающих электрических колебаний заряда на конденсаторе в колебательном контуре:

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dq}{dt} + \frac{1}{LC} q = 0 \quad (5.2)$$

Продифференцировав по времени, можно получить дифференциальное уравнение гармонических колебаний для силы тока в контуре:

$$\frac{d^2i}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{di}{dt} + \frac{1}{LC} i = 0. \quad (5.3)$$

Введем обозначения: $R/L = 2\beta$; $1/LC = \omega_0^2$. Перепишем уравнение (3) в виде:

$$\frac{d^2i}{dt^2} + 2\beta \frac{di}{dt} + \omega_0^2 i = 0. \quad (5.4)$$

При $\beta < \omega_0$ это уравнение имеет решение

$$i = I_0 e^{-\beta t} \sin \omega t, \quad (5.5)$$

где I_0 - постоянная, определяемая начальными условиями;

число e – основание натурального логарифма.

Максимальное отклонение колеблющейся величины от положения равновесия называется **амплитудой** колебания, это выражение, стоящее перед функцией $\sin$ в формуле (5.5).

Из решения уравнения, **циклическая частота** затухающих колебаний равна

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}. \quad (5.6)$$

Таким образом, в замкнутой цепи из последовательно соединенных конденсатора C , индуктивности L и сопротивления R , сила тока совершает затухающие гармонические колебания, амплитуда которых убывает со временем по закону

$$A_i(t) = I_0 e^{-\beta t} \quad (5.7)$$

Период затухающих колебаний силы тока

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}}. \quad (5.8)$$

Величину β , определяющую уменьшение амплитуды колебаний со временем, называют **коэффициентом затухания**. График изменения силы тока со временем при затухающих электромагнитных колебаний представлен на рис. 5.2. Их затухание обусловлено превращением электромагнитной энергии в тепловую при нагревании электрическим током резистора R .

Решение уравнения (5.3) для электрического заряда аналогично решению для силы тока, поэтому амплитуда затухающих гармонических колебаний заряда q на

обкладках конденсатора имеет вид $A_q = q_0 e^{-\beta t}$, где q_0 – начальный заряд на конденсаторе. Напряжение $U = \frac{q}{C}$ тоже совершает затухающие гармонические колебания с убывающей амплитудой $A_u = U_0 e^{-\beta t}$, где U_0 определяется начальными условиями. Колебания заряда q и напряжения U происходят с той же циклической частотой ω и с тем же периодом T , что и сила тока.

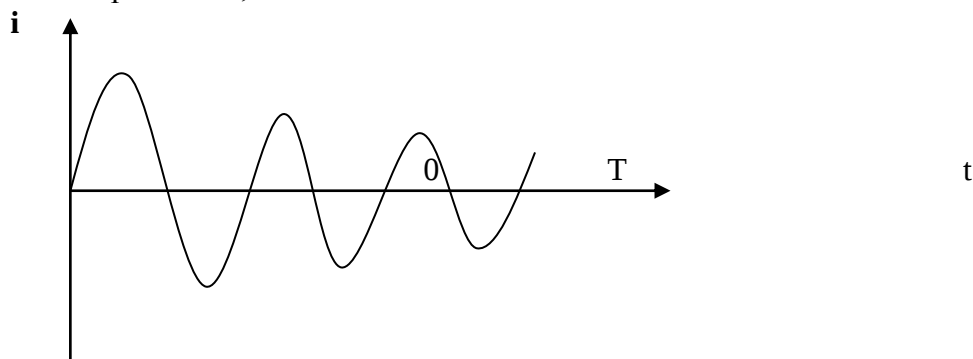


Рис.5.2

Количественной характеристикой быстроты затухания служит логарифмический декремент затухания λ , который равен натуральному логарифму отношения амплитуд, взятых через период колебаний T . Например для напряжения U декремент затухания

$$\lambda = \ln \frac{U_0 e^{-\beta t}}{U_0 e^{-\beta(t+T)}} = \ln e^{-\beta T} = \beta T. \quad (5.9)$$

Для колебаний силы тока i и заряда q логарифмический декремент затухания λ имеет то же самое значение.

Подставив в выражение (5.9) коэффициент затухания $\beta = R/2L$ получим

$$\lambda = \frac{RT}{2L}. \quad (5.10)$$

Период затухающих колебаний зависит от характеристик контура R , L и C , поэтому логарифмический декремент затухания является характеристикой колебательного контура.

Зная логарифмический декремент затухания λ , можно определить и период колебаний T , однако определить по изображению на экране отношение двух амплитуд весьма затруднительно. Среднюю равновесную линию определить на экране с хорошей точностью сложно. Поэтому для вычисления λ используют измерение расстояния от максимума до ближайшего минимума.

Расстояние от максимума до ближайшего минимума колеблющейся величины называют размахом колебаний S . Два соседних размаха S_1 и S_2 колебания напряжения U на конденсаторе обозначены на рис.5.3. Каждый размах равен сумме двух амплитуд, отстоящих друг от друга на половину периода T . Поэтому

$$S_1 = A_U + A_{U1} = U_0 e^{-\beta t} + U_0 e^{-\beta(t+T)} = U_0 e^{-\beta t} (1 + e^{-\beta T/2})$$

$$S_2 = A_{U1} + A_{U2} = U_0 e^{-\beta(t+T/2)} + U_0 e^{-\beta(t+T)} = U_0 e^{-\beta t} e^{-\beta T/2} (1 + e^{-\beta T/2})$$

Разделим первое уравнение размаха на второе и прологарифмируем по основанию e

$$\ln \frac{S_1}{S_2} = n e^{\beta T / 2} = \frac{\beta T}{2}$$

Отсюда $\beta T = 2 \ln \frac{S_1}{S_2}$.

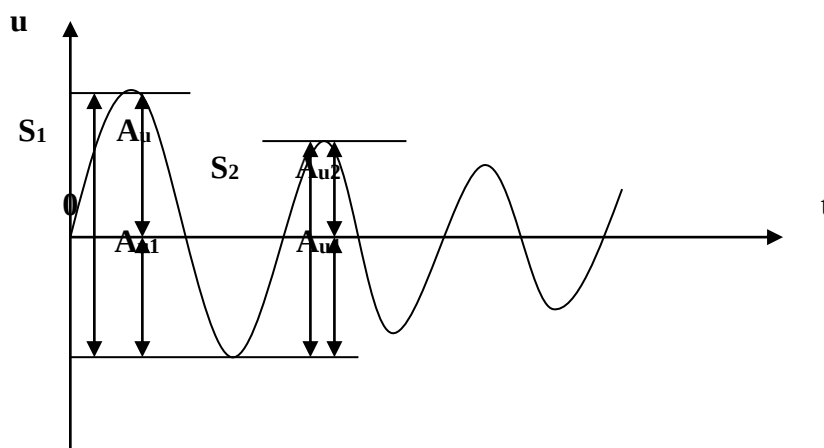


Рис.5.3

Подставив в (5.9) получаем формулу для вычисления логарифмического декремента затухания в данной лабораторной работе

$$\lambda = 2 \ln \frac{S_1}{S_2}. \quad (5.11)$$

Период колебаний в данной лабораторной работе определяем по формуле, полученной из (5.10)

$$T = \frac{2\lambda L}{R}. \quad (5.12)$$

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Приборы и принадлежности: осциллограф, соленоидальная катушка с подвижным сердечником, конденсатор, тумблер.

Работа позволяет определить логарифмический декремент затухания, период и частоту колебаний колебательного контура.

Колебательный контур MNOPM (рис. 5.4) содержит последовательно соединенные конденсатор ёмкостью C и катушку с активным сопротивлением R и переменной индуктивностью L . Потерями энергии в соединительных проводах и конденсаторе можно пренебречь и считать, что активное сопротивление контура R .

Для возбуждения колебаний в контуре используются прямоугольные импульсы, вырабатываемые генератором, входящим в электрическую схему. После того, как импульсы заряжают конденсатор C , в контуре возникают колебания. Частота следования импульсов такова, что к приходу следующего импульса колебания полностью затухают. Возникает устойчивая картина затухающих колебаний.

Питание контура осуществляется подключением узла M (см. рис. 5.4) к клемме генератора, а узла 0 – к клемме «земля» усилителя вертикального отклонения на

передней панели осциллографа. Для анализа колебаний достаточно подключить узел N к другой клемме усилителю вертикального отклонения.

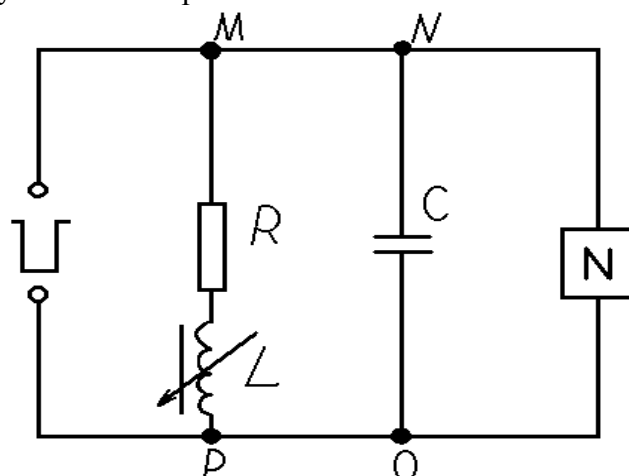


Рис.5.4.

Перед выполнением эксперимента следует подготовить таблицу для занесения результатов наблюдений:

Номер опыта	1 – й контур $L_1=0,007$ Гн; $R=12$ Ом			2 – й контур $L_2=0,07$ Гн; $R_2=12$ Ом		
	S_1	S_2	λ_1	S_1	S_2	λ_2
1						
2						
3						

1. Подключить колебательный контур (узлы N и O) к клеммам входа усилителя вертикального отклонения, а узел M – к генератору. Проверить отсутствие сердечника в катушке (если сердечник вставлен в катушку – вынуть его).
2. После проверки электрической схемы преподавателем или лаборантом включить осциллограф в сеть и установить тумблер в положение «Вкл», включив тем самым генератор. После прогрева на его экране появится изображение затухающих колебаний напряжения U на конденсаторе.
3. Ручками для перемещения осей X и Y передней панели осциллографа установить изображение колебаний так, чтобы первый минимум попал на целое деление измерительной сетки экрана. Измерить с точностью 0,5 деления сетки экрана два последовательных размаха S_1 и S_2 и записать в первую строку левой части таблицы.
4. Поворотом ручки «Вертикальное усилие» изменить размеры изображения на несколько делений измерительной сетки экрана. Измерить два последовательных размаха S_1 и S_2 и записать во вторую строку левой части таблицы.
5. Повторить операции, записанные в пункте 4, занося результаты в третью строку левой части таблицы.
6. Вставить сердечник в катушку, и повторить операции, записанные в пунктах 3-5, занося результаты измерений в правую часть таблицы.
7. По формуле (5.11) с точностью до трех значащих цифр вычислить и занести в таблицу логарифмические декременты затухания для каждой пары значений S_1 и S_2 .

8. Вычислить средние значения $\langle \lambda_1 \rangle$ и $\langle \lambda_2 \rangle$ для колебаний в каждом из двух контуров. Результаты вычислений в этом и последующих контурах округлить до двух значащих цифр.
9. Определить периоды колебаний T_1 и T_2 в каждом контуре, подставляя $\langle \lambda_1 \rangle$, R , L_1 , $\langle \lambda_2 \rangle$, R , L_2 в формулу (5.12). Значения индуктивностей и емкостей и активных сопротивлений катушек указаны в таблице.
10. Вычислить частоты колебаний f_1 и f_2 в обоих контурах, используя соотношение:

$$f = \frac{1}{T}.$$
11. Проанализировать полученные результаты.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какую электрическую цепь называют колебательным контуром?
2. Какие виды энергии составляют полную энергию колебательного контура? Чему они равны?
3. Записать уравнение сохранения энергии в колебательном контуре.
4. Чем объясняется уменьшение энергии в колебательном контуре?
5. Записать дифференциальное уравнение затухающих электрических колебаний силы тока в контуре.
6. Какова зависимость силы тока от времени в колебательном контуре?
7. Записать формулы для циклической частоты, периода и амплитуды колебаний силы тока в контуре.
8. Что называется декрементом затухания и логарифмическим декрементом затухания?
9. Как логарифмический декремент затухания связан с коэффициентом затухания?
10. Что называется амплитудой и размахом колебаний?
11. Записать рабочую формулу, связывающую логарифмический декремент затухания с размахами колебаний.
12. По какой формуле при обработке результатов измерений определяется период колебаний в контуре?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калашников, С.Г. Электричество / С.Г. Калашников. – 6-е изд., стереот. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. - 624 с.
2. Трофимова, Т.И. Курс физики: Учебное пособие для инженерно-технических специальностей вузов/ Т.И.Трофимова.- 18-е изд., стер..- М: Академия, 2010.- 560с
3. Савельев, И.В. Курс общей физики. В 3-х т.: Учебное пособие для студ.вузов/ И.В.Савельев.- 10-е изд.,стер..- СПб: Лань. - (Учебники для вузов. Специальная литература) Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика.- 2008.- 496с.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Калашников, С.Г. Электричество / С.Г. Калашников. – 6-е изд., стереот. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. - 624 с.
2. Трофимова, Т.И. Курс физики: Учебное пособие для инженерно-технических специальностей вузов/ Т.И.Трофимова.- 18-е изд., стер..- М: Академия, 2010.- 560с

3. Сивухин, Д.В. Общий курс физики. В 5 т. Том III. Электричество. Сивухин Д.В. 5-е изд., стереот. — М.: ФИЗМАТЛИТ; Изд-во МФТИ, 2009. - 656 с.
4. Савельев, И.В. Курс общей физики. В 3-х т.: Учебное пособие для студ.вузов/ И.В.Савельев.- 10-е изд., стер..- СПб: Лань. - (Учебники для вузов. Специальная литература) Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика.- 2008.- 496с.
5. Детлаф, А.А. Курс физики учеб. пособие / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский.-7-е изд. Стер.-М. : ИЦ «Академия».-2008.-720 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Лабораторная работа № 1. Изучение электроизмерительных приборов	4
Лабораторная работа № 2. Магнитное поле Земли	16
Лабораторная работа № 3. Гистерезис ферромагнетиков	23
Лабораторная работа № 4. Определение индуктивности соленоида	31
Лабораторная работа № 5. Изучение затухающих колебаний в колебательном контуре	37
Библиографический список	43
Содержание	45