

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
НОВГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ЯРОСЛАВА МУДРОГО

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

Методические указания к лабораторным работам

ВЕЛИКИЙ НОВГОРОД
2005

Р е ц е н з е н т

кандидат физико-математических наук, доцент А. И. Георгиев

Электромагнетизм: Метод. Указания к лабораторным работам /Сост.: З. С. Бондарева, Г. Е. Коровина, В. Д. Лебедева, Н.А. Петрова, В.Е. Удальцов, В. В. Шубин; – НовГУ им. Ярослава Мудрого. - Великий Новгород, 2003. - 70 с.

В сборник включены лабораторные работы по электромагнетизму. Этот раздел физики изучается студентами всех инженерных и физических специальностей. Лабораторные работы, включенные в сборник посвящены изучению земного магнетизма, магнетизма электрического тока, явления электромагнитной индукции и переменного тока. Сборник предназначен для студентов всех специальностей очной и заочной форм обучения, изучающих общий курс физики.

УДК 53 (0765)

© Новгородский государственный
университет, 2005

© З. С. Бондарева, Г. Е. Коровина,
В. Д. Лебедева, Н.А. Петрова,
В.Е. Удальцов, В. В. Шубин,
составление, 2005

ПРЕДИСЛОВИЕ

В методические указания вошли лабораторные работы по курсу “Общей физики”, включающие в себя разделы “Электромагнетизм” (лабораторные работы 1-9) и “Переменный ток” (лабораторная работа 10) и предназначенная для студентов НовГУ всех специальностей дневной и заочной форм обучения, изучающих общий курс физики. Лабораторные работы составлены с учетом того, что студенты должны изучить их содержание и указанную литературу до начала занятий, с тем чтобы перед выполнением лабораторной работы иметь ясное представление о физическом явлении.

Описание каждой лабораторной работы содержит: краткое изложение теории физического явления, описание экспериментальной установки, методические указания к выполнению работы, контрольные вопросы.

Необходимость теоретического введения к каждой работе продиктована тем, что в большинстве случаев студент выполняет лабораторную работу раньше, чем соответствующий материал будет изложен в лекционном курсе.

Контрольные вопросы, приводимые в конце каждой работы, предназначены для того, чтобы облегчить студентам самоконтроль при изучении материала и заострить их внимание на главном в изучаемом явлении. Кроме того, контрольные вопросы вынуждают студента обратиться к учебнику, к лекциям и предлагают сделать самостоятельные выводы из полученных при выполнении работы результатов.

Каждую лабораторную работу следует рассматривать как небольшое экспериментальное исследование студента под руководством преподавателя. В конце лабораторных работ приводится список литературы.

Содержание

Предисловие.....	3
1 Лабораторная работа «Определение горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли»	5
2. Лабораторная работа «Определение напряженности магнитного поля Земли при помощи земного индуктора»	12
3 Лабораторная работа «Определение коэффициента взаимной индукции двух соленоидов».....	18
4 Лабораторная работа «Исследование взаимодействия двух катушек с током»..	27
5 Лабораторная работа «Определение удельного заряда электрона при помощи магнетрона»	33
6 Лабораторная работа «Определение удельного заряда электрона методом фокусировки электронного пучка продольным магнитным полем»	40
7 Лабораторная работа «Снятие кривой намагничивания и петли гистерезиса с помощью осциллографа»	46
8 Лабораторная работа «Определение точки Кюри с помощью осциллографа»..	59
9 Лабораторная работа «Определение точки Кюри с помощью индуктивно-омического делителя»	61
10 Лабораторная работа «Индуктивность и емкость в цепи переменного тока»....	64
Приложение А (справочное)	
Вывод формул амплитудного значения тока и тангенса сдвига фаз	

Предисловие

Настоящий сборник лабораторных работ по курсу общей физики включает в себя разделы «Электромагнетизм» (лабораторные работы 1 - 9) и «Переменный ток» (лабораторная работа 10), и предназначен для студентов НовГУ всех специальностей дневной и заочной форм обучения. Лабораторные работы составлены с учетом того, что студенты должны изучить их содержание и указанную литературу до начала занятий, с тем чтобы перед выполнением лабораторной работы было ясное представление о физическом явлении.

Описание каждой лабораторной работы содержит: краткое изложение теории физического явления, описание экспериментальной установки, методические указания к выполнению работы, контрольные вопросы.

Необходимость теоретического введения к каждой работе продиктована тем, что в большинстве случаев студент выполняет лабораторную работу раньше, чем соответствующий материал будет изложен в лекционном курсе.

Контрольные вопросы, приводимые в конце каждой работы, предназначены для того, чтобы облегчить студентам самоконтроль при изучении материала и заострить их внимание на главном в изучаемом явлении. Кроме того, контрольные вопросы вынуждают студента обратиться к учебнику, к лекциям и предлагают сделать самостоятельные выводы из полученных при выполнении работы результатов.

Каждую лабораторную работу следует рассматривать как небольшое экспериментальное исследование студента под руководством преподавателя.

В конце лабораторных работ приводится список рекомендуемой литературы.

1 Лабораторная работа «Определение горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли»

1.1 Цель работы

Определение горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли с помощью тангенс – гальванометра.

1.2 Основные сведения и законы

Магнитное поле Земли

Земля представляет собой огромный магнит, полюса которого лежат вблизи географических полюсов: вблизи северного географического полюса расположен южный магнитный полюс S_M , а вблизи южного географического – северный магнитный полюс N_M .

До настоящего времени нет законченной теории, объясняющей происхождение магнитного поля Земли и его особенностей. По последним гипотезам поле Земли связано с токами, циркулирующими по поверхности ядра Земли, и, отчасти, намагниченностью горных пород и токами в радиационных поясах.

Магнитное поле Земли проявляется нагляднее всего своим действием на магнитную стрелку: свободно подвешенная магнитная стрелка устанавливается в каждой точке земного шара в определенном положении (на этом основано действие компаса). Магнитное поле Земли намагничивает находящееся в нем железо, индуцирует в движущихся проводниках электрические токи и обладает всеми другими свойствами магнитного поля.

Существование земного магнетизма и свойства магнитной стрелки были известны издавна. В китайских летописях указывается, что для определения направления на север в 10 - 11 веках до нашей эры пользовались магнитными стрелками. По свидетельству греческих и римских историков уже в седьмом веке до нашей эры знали о том, что некоторые камни притягивают к себе железо. Первые упоминания о применении магнитной стрелки европейскими мореплавателями относятся к 12 веку.

Магнитное поле Земли складывается из двух частей, различных по происхождению:

1) Постоянное (или, точнее, “устойчивое”) поле порядка 0,5 эрстеда ($1 \text{ эрстед} = (1/4\pi) \cdot 10^3 \text{ А/м}$). Оно различно в разных точках земной поверхности и подвержено медленным (вековым) изменениям. Существование его обусловлено магнетизмом самого земного шара.

2) Переменное поле (или магнитные вариации) не превышает, как правило, по величине 1% постоянного поля; оно вызывается электрическими токами,

текущими в верхних слоях земной атмосферы (ионосферы) или даже за её пределами.

Магнитные вариации бывают двух типов: медленные и быстрые колебания различной формы и амплитуды – магнитные возмущения или магнитные бури, которые тесно связаны с солнечной деятельностью.

В настоящее время общепринятой является корпускулярная теория магнитных бурь, согласно которой возмущения магнитного поля ионосферы и полярные сияния вызываются проникновением в атмосферу Земли летящих от Солнца заряженных частиц (корпускул). Частицы излучаются активными областями солнечной поверхности в виде узких, радиально направленных пучков.

Скорость корпускул порядка 1000 - 3000 км/ч. Поток состоит из частиц обоих знаков и в целом нейтрален. Корпускулярная теория хорошо объясняет ряд свойств магнитных возмущений: географическое распределение, тенденцию магнитных бурь повторяться через 27 дней (период вращения Солнца), годовой и 11-летний ход магнитной активности, связь магнитных бурь с солнечными пятнами и т.д.

В некоторых районах земного шара наблюдаются отклонения от так называемых нормальных значений элементов земного магнетизма. Эти отклонения называются магнитными аномалиями. Они могут охватывать как значительные части земной поверхности, так и сравнительно небольшие области (локальные аномалии), от нескольких десятков тысяч квадратных километров до нескольких квадратных метров. Наиболее интенсивные магнитные аномалии связаны с залежами железных магнетитовых руд и других пород, обогащенных магнетитом.

Магнитное поле Земли в первом приближении совпадает с магнитным полем диполя “ав” (прямого магнита с некоторым магнитным моментом P_m), помещенным в центре Земли (рисунок 1.1).

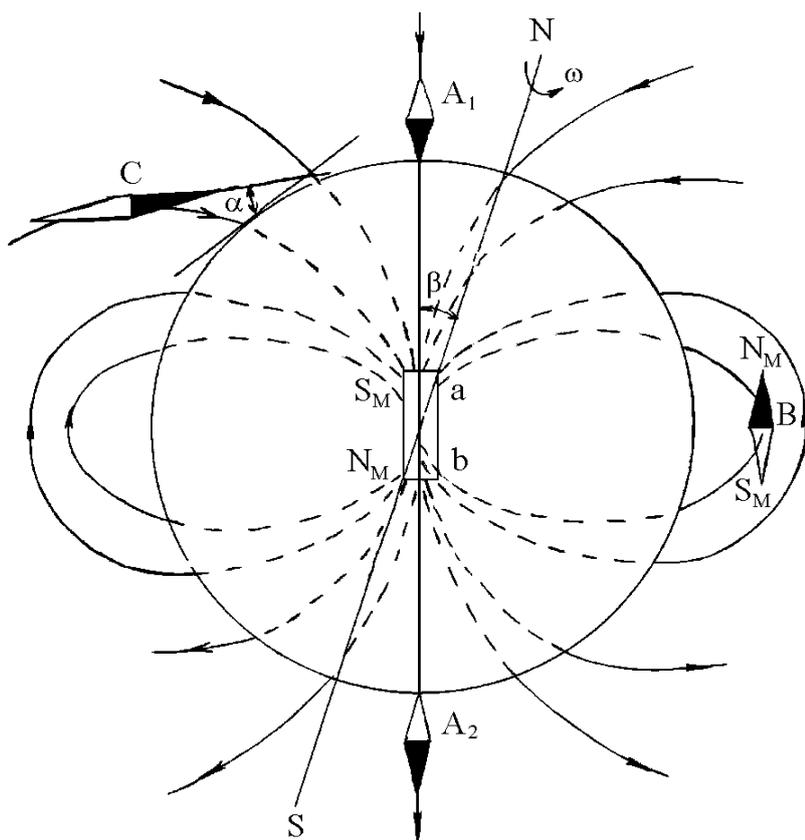


Рисунок 1.1 – Магнитное поле Земли

Вектор напряженности магнитного поля Земли \vec{H} на экваторе направлен горизонтально (точка B), а на магнитных полюсах – вертикально (точки – A_1 и A_2).

В остальных точках земной поверхности вектор напряженности магнитного поля Земли \vec{H} направлен под некоторым углом к горизонтальной плоскости точка C .

Величину проекции вектора напряженности магнитного поля Земли на горизонтальную плоскость называют горизонтальной составляющей магнитного поля Земли H_H . Направление этой составляющей принимается за направление магнитного меридиана, а вертикальная плоскость, проходящая через него, называется плоскостью магнитного меридиана. Угол между направлением вектора напряженности магнитного поля Земли \vec{H} и горизонтальной плоскостью называется углом наклона (угол α на рисунке 1.1 и 1.2). Угол между географическим и магнитным меридианом называется углом склонения (угол β на рисунке 1.1).

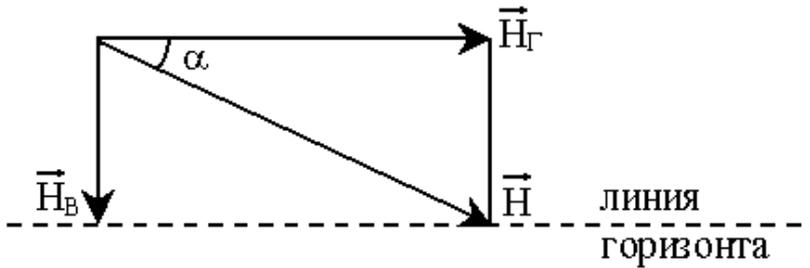


Рисунок 1.2 – Напряженность поля Земли в произвольной точке

Закон Био-Савара-Лапласа

Основной закон электромагнетизма, закон Био-Савара-Лапласа, устанавливает соотношение между силой тока в проводнике (электродинамической величиной) и напряженностью магнитного поля, которое возникает в пространстве, окружающем проводник. Этот закон в СИ в векторной форме имеет вид:

$$\overrightarrow{dH} = \frac{\overrightarrow{I \cdot d\ell} \times \vec{r}}{4\pi \cdot r^3}, \quad (1)$$

где \overrightarrow{dH} – напряженность магнитного поля в точке А, созданная элементом тока $\overrightarrow{I \cdot d\ell}$ на расстоянии \vec{r} от него,

$\angle \alpha$ – угол между элементом тока и радиусом-вектором (рисунок 1.3).

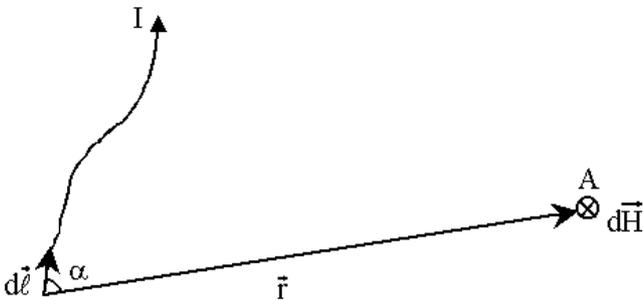


Рисунок 1.3 – Магнитное поле тока

Модуль вектора напряженности определяется:

$$dH = \frac{I \cdot d\ell \cdot \sin \alpha}{4\pi \cdot r^2}. \quad (2)$$

Из соотношения (1) по правилу правой тройки векторов вектор \overrightarrow{dH} направлен перпендикулярно плоскости, содержащей вектора $\overrightarrow{I \cdot d\ell}$ и \vec{r} .

Уравнение (1) допускает очень простое решение в двух случаях: в случае замкнутого кругового тока и прямого тока бесконечной длины.

Вычислим напряженность магнитного поля в центре кругового тока (в точке О, рисунок 1.4). Обозначим радиус кругового тока через R. В формуле (2) для этого случая знаменатель остается постоянным $r = R$.

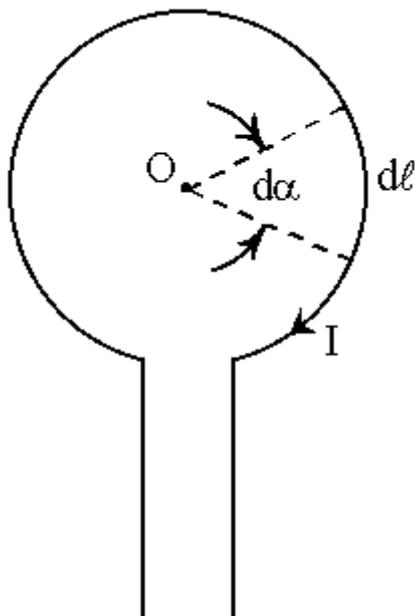


Рисунок 1.4 – Виток с током

Угол α для всех точек окружности равен $\pi/2$, следовательно, $\sin\alpha = 1$. На основании этого формула (2) принимает вид:

$$dH = \frac{I \cdot d\ell}{R^2 \cdot 4\pi}. \quad (3)$$

Интегрируя это выражение по всей длине окружности, т.е. в пределах от $\ell = 0$ до $\ell = 2\pi R$, находим:

$$H = \frac{I}{4\pi \cdot R^2} \int_0^{2\pi R} d\ell = \frac{I}{2R};$$

$$H = \frac{I}{2R}. \quad (4)$$

1.3 Теория метода и описание установки

Магнитная стрелка, которая может вращаться лишь около вертикальной оси, будет отклоняться в горизонтальной плоскости только под действием горизонтальной составляющей магнитного поля.

Это свойство магнитной стрелки используется в тангенс-гальванометре для определения горизонтальной составляющей магнитного поля Земли (H_H). Тангенс-гальванометр представляет собой плоскую вертикальную катушку радиуса R с некоторым числом витков N . Радиус катушки и число витков указаны на тангенс-гальванометре.

В центре катушки в горизонтальной плоскости расположен компас. Магнитная стрелка компаса при отсутствии тока в катушке расположена по магнитному меридиану Земли $N_M S_M$ (см. рисунок 1.1).

Поворотом катушки вокруг вертикальной оси можно совместить плоскость катушки с плоскостью магнитного меридиана. Если по катушке пропустить ток, то магнитная стрелка повернется на некоторый угол φ . Объясняется это тем, что на магнитную стрелку будут действовать два поля: горизонтальная составляющая напряженности магнитного поля Земли $\vec{H}_Г$ и магнитное поле тока \vec{H}_I (рисунок 1.5). Под действием этих полей магнитная стрелка займет такое положение, вдоль которого направлена равнодействующая двух полей (\vec{H}). На рисунке 1.5 $S_M N_M$ – направление магнитного меридиана Земли; А и В – сечения витков катушки горизонтальной плоскостью; NS – магнитная стрелка компаса, помещенная в центре катушки, $\vec{H}_Г$ – вектор горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли, \vec{H}_I – вектор напряженности магнитного поля, созданного током в катушке, направленный перпендикулярно к плоскости катушки.

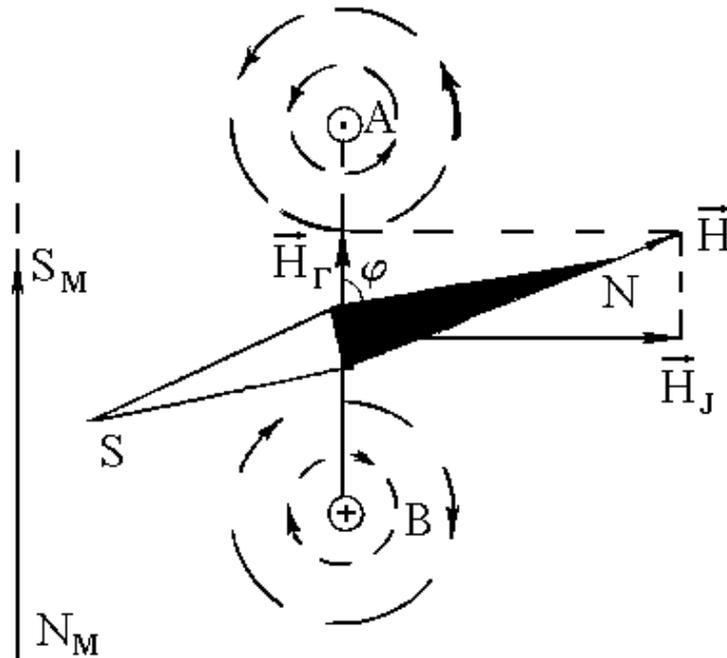


Рисунок 1.5 – Ориентация магнитной стрелки под действием двух полей (вид сверху)

Из рисунка 1.5 видно, что $\operatorname{tg}\varphi = \frac{H_I}{H_G}$.

Величина напряженности магнитного поля в центре кругового тока определяется по формуле (4):

$$H_I = \frac{I}{2R},$$

где I – ток, текущий в витке;

$2R = D$ – диаметр витка катушки в метрах.

Если катушка содержит N витков, то напряженность поля будет:

$$H_I = \frac{I \cdot N}{D}. \quad (6)$$

Подставив значение H_I в формулу (5), для H_Γ получим:

$$H_\Gamma = \frac{I \cdot N}{D \cdot \operatorname{tg} \varphi}. \quad (7)$$

Формулу (7) используют для опытного определения горизонтальной составляющей магнитного поля Земли H_Γ . В системе СИ напряженность измеряется в А/м.

1.4 Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

1) Собрать электрическую цепь из тангенс-гальванометра G , амперметра mA , источника тока ε , переключателя направления тока K и реостата R (рисунок 1.6).

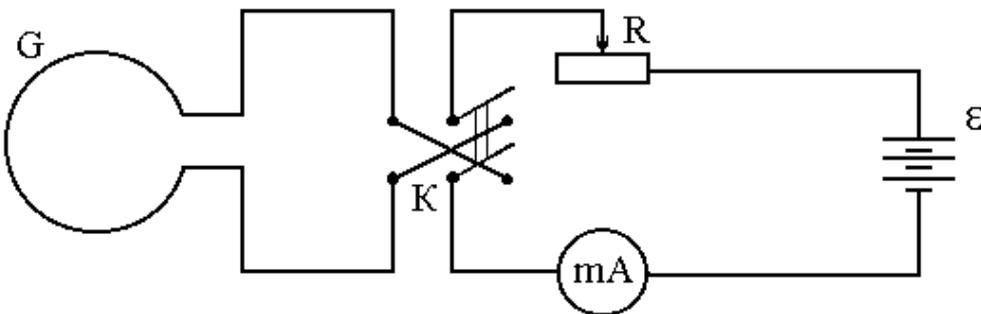


Рисунок 1.6 – Электрическая схема установки

2) Установить плоскость катушки тангенс-гальванометра в плоскости магнитного меридиана.

3) Включить катушку на 25 витков и, изменяя силу тока, добиться поворота стрелки компаса на угол $\varphi = 45^\circ$ при котором погрешность определения горизонтальной составляющей H_Γ минимальна. С помощью переключателя K изменить направление тока в катушке и снова добиться отклонения стрелки на угол $\varphi = 45^\circ$.

4) Включить катушку на 50 витков и произвести измерение тока, как указано в п.3.

5) Те же измерения произвести и с катушкой, содержащей 75 витков. Результаты наблюдений и вычислений записать в таблицу 1.1.

Таблица 1.1

Количество витков, вит.	Ток в амперах		$I_{\text{ср}} \cdot N$, А·вит.	$\Delta(I \cdot N)$, А·вит
	I , А	$I_{\text{ср}}$, А		
25				
50				
75				
среднее				

6) Определить H_{Γ} – горизонтальную составляющую магнитного поля Земли по усредненному значению числа ампер-витков.

7) Рассчитать относительную и абсолютную погрешность H_{Γ} .

1.5 Техника безопасности

1) Перед включением схемы убедиться, что регулятор напряжения выпрямителя находится в крайнем левом положении.

2) Сопротивление R установить несколько сотен Ом.

3) Миллиамперметр установить на предел не менее 300 мА.

4) Схему можно включить только после проверки и с разрешения преподавателя или лаборанта.

5) Во время работы не касаться токоведущих частей установки.

6) После выполнения работы и проверки результатов схему разобрать.

1.6 Контрольные вопросы

1) Дайте определение элементов земного магнетизма.

2) Сформулируйте закон Био-Савара-Лапласа и примените его к расчету магнитного поля кругового тока.

3) Рассмотрите метод определения горизонтальной составляющей магнитного поля Земли с помощью тангенс-гальванометра.

4) Выведите формулу относительной погрешности и докажите, что она минимальна при угле $\varphi = 45^\circ$.

2. Лабораторная работа «Определение напряженности магнитного поля Земли при помощи земного индуктора»

2.1 Цель работы

Определение напряженности магнитного поля Земли и магнитного наклона с помощью Земного индуктора.

2.2 Теория метода и описание установки

Для измерения напряженности магнитного поля Земли (см. главу 1.1) служит Земной индуктор. Он представляет собой плоскую катушку с несколькими витками провода, которая может вращаться вокруг горизонтальной (или вертикальной) оси, лежащей в плоскости витков катушки (см. рисунок 2.1).

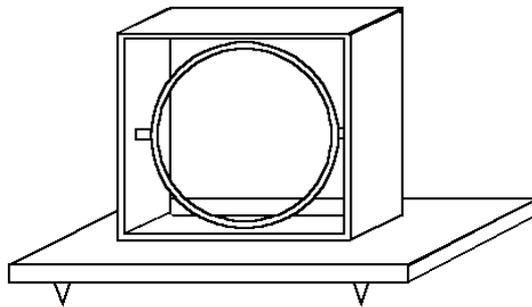


Рисунок 2.1 – Общий вид установки

Острия, на которые опирается катушка, укреплены в раме. Раму можно поворачивать и закреплять в нужном положении.

Напряженность магнитного поля Земли в данной местности может быть определена, если известны горизонтальная ($\vec{H}_Г$) и вертикальная ($\vec{H}_В$) её составляющие (рисунок 2.2).

$$H = \sqrt{H_G^2 + H_B^2}. \quad (8)$$

Магнитное наклонение (на рисунке 2.2 это угол α) можно найти как:

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{H_B}{H_G}. \quad (9)$$

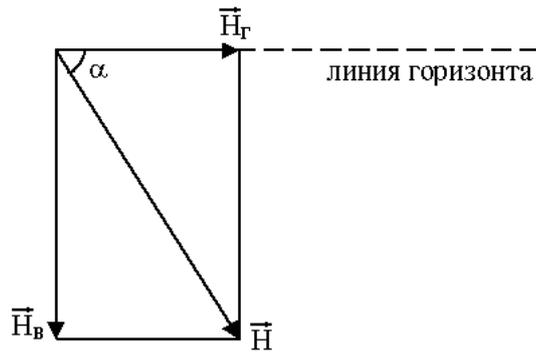


Рисунок 2.2 – Вектор напряженности магнитного поля Земли в произвольной точке

Для определения горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля обмотку катушки замыкают на баллистический гальванометр. Устанавливают катушку так, чтобы плоскость её была перпендикулярна плоскости магнитного меридиана. (Плоскостью магнитного меридиана называется вертикальная плоскость, в которой лежит вектор напряженности магнитного поля Земли). Затем поворачивают катушку на 180° вокруг вертикальной оси.

Магнитный поток, пронизывающий катушку при её вращении, будет изменяться по закону:

$$\Phi = \Phi_0 \cdot \cos\varphi = \mu_0 \cdot H_r \cdot S \cdot \cos\varphi, \quad (10)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м;

S – площадь катушки Земного индуктора;

φ – угол между горизонтальной составляющей вектора напряженности и нормалью к плоскости катушки.

Элементарный заряд dq , который протечет по катушке при повороте её на малый угол $d\varphi$, будет равен:

$$dq = -\frac{d\Phi}{r} \cdot N, \quad (11)$$

где

$d\Phi$ – приращение магнитного потока через плоскость рамки при этом повороте;

N – число витков катушки;

r – сопротивление цепи катушки, которое складывается из сопротивления гальванометра r_g и сопротивления катушки r_k .

При быстром повороте катушки из первоначального положения на 180° по цепи протекает заряд, равный:

$$q = -\frac{N}{r} \int_{\Phi_1}^{\Phi_2} d\Phi = -\frac{N}{r} (\Phi_2 - \Phi_1),$$

где Φ_1 – начальный поток; Φ_2 – конечный поток.

Если $\Phi_1 = \Phi_{\max}$, $\Phi_2 = -\Phi_{\max}$, то

$$q = \frac{2\Phi_{\max} \cdot N}{r} = \frac{2\mu_0 \cdot H_{\Gamma} \cdot S \cdot N}{r}.$$

Из полученного выражения найдем H :

$$H_{\Gamma} = \frac{q \cdot r}{2\mu_0 \cdot S \cdot N}. \quad (12)$$

Прошедший по катушке заряд определим по максимальному отбросу указателя гальванометра, присоединенного к катушке:

$$q = n_{\max} \cdot \beta, \quad (13)$$

где β – баллистическая постоянная гальванометра, которая определяется отдельно (см. раздел 2.2, п. 6). Подставив значение q в выражение (12), получим:

$$H_{\Gamma} = \frac{\beta \cdot r \cdot n_{\max}}{2 \cdot \mu_0 \cdot S \cdot N}. \quad (14)$$

Для определения вертикальной составляющей напряженности магнитного поля Земли катушку Земного индуктора следует расположить так, чтобы её плоскость была горизонтальна, а ось вращения лежала в плоскости магнитного меридиана, и быстро повернуть на 180° вокруг горизонтальной оси. Тогда по максимальному отбросу подвижной системы баллистического гальванометра (m_{\max}) можно определить вертикальную составляющую (H_B). Она определяется аналогично горизонтальной составляющей:

$$H_B = \frac{\beta \cdot r \cdot m_{\max}}{2 \cdot \mu_0 \cdot S \cdot N}. \quad (14)$$

Подставив в выражение (9) и (10) значение вертикальной и горизонтальной составляющих напряженности магнитного поля Земли, получим формулы для определения напряженности магнитного поля Земли в данной точке и магнитного наклона:

$$H = \frac{\beta \cdot r}{2 \cdot \mu_0 \cdot S \cdot N} \cdot \sqrt{n_{\max}^2 + m_{\max}^2}; \quad (14)$$

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{m_{\max}}{n_{\max}}. \quad (17)$$

2.3 Порядок выполнения работы

1) Собрать электрическую схему (рисунок 2.3).

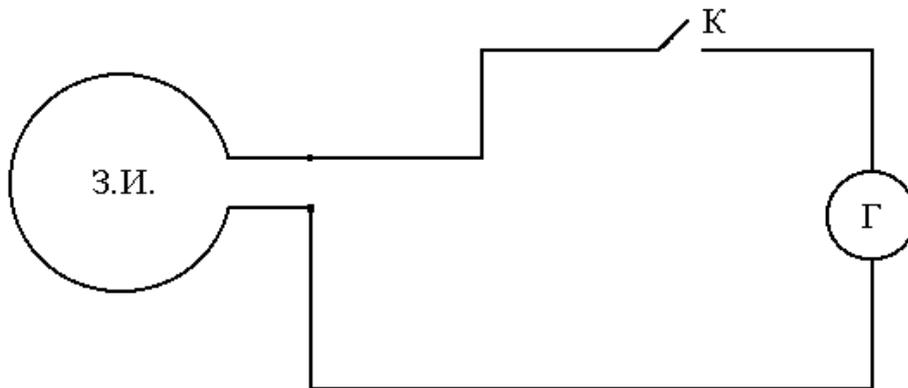


Рисунок 2.3 – Электрическая схема установки

2) Установить Земной индуктор так, чтобы его ось вращения была расположена вертикально, а плоскость катушки перпендикулярна плоскости магнитного меридиана (использовать компас).

3) Замкнуть ключ К и быстро повернуть катушку на 180° , измерить n_{\max} – максимальный отброс указателя гальванометра. Измерения произвести не менее 5 раз. Найти среднее значение максимального отброса указателя гальванометра. Опыт проделать для $N = 25, 50$ и 75 витков. Результаты измерений занести в таблицу 2.1.

Таблица 2.1

Число витков, вит	n_{\max}	m_{\max}	n_{\max} среднее	m_{\max} среднее	H	$\operatorname{tg} \alpha$	α

4) Установить Земной индуктор так, чтобы плоскость катушки была расположена горизонтально, а ось её вращения – параллельно плоскости магнитного меридиана.

5) Замкнуть ключ К, и быстро поворачивая катушку на 180° , измерить максимальный отброс указателя гальванометра – m_{\max} . Измерения произвести 5

раз. Найти среднее значение максимального отброса указателя. Опыт проделать для $N = 25, 50$ и 75 витков. Результаты измерения занести в таблицу 2.1.

б) Определить баллистическую постоянную гальванометра. Для этого собрать схему, представленную на рисунке 2.4.

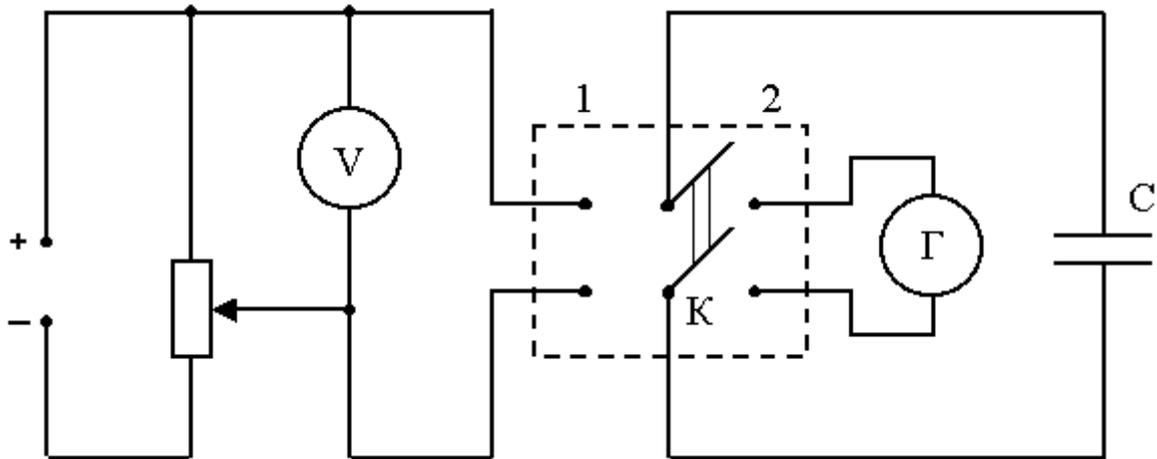


Рисунок 2.4 – Электрическая схема установки для определения баллистической постоянной гальванометра

Замыкая переключатель K в положение 1, зарядить конденсатор известной емкости C . Переведя переключатель в положение 2, разрядить конденсатор через гальванометр и отметить наибольший отброс указателя гальванометра n . Баллистическую постоянную β определить по формуле:

$$\beta = \frac{C \cdot U}{n},$$

где U – напряжение на конденсаторе.

7) По формулам (16) и (17) рассчитать напряженность магнитного поля Земли и магнитное наклонение в данной местности. Значения сопротивлений r_k и r_q указаны на установке.

8) Рассчитать среднее значение напряженности и среднее значение магнитного наклонения.

9) По среднему значению рассчитать абсолютную и относительную погрешность для напряженности и магнитного наклонения. Записать конечные результаты измерений и вычислений в виде:

$$H = H_{cp} \pm \Delta H;$$

$$\alpha = \alpha_{cp} \pm \Delta \alpha.$$

2.4 Техника безопасности

1) Предел измерения гальванометра подобрать таким, чтобы отброс указателя был в пределах шкалы, но не менее 10 делений.

2) Перед включением схемы для определения баллистической постоянной убедиться, что регулятор напряжения выпрямителя находится в крайнем левом положении.

3) В процессе работы не касаться токоведущих частей установки.

4) Напряжение на конденсаторе подобрать таким образом, чтобы отброс указателя гальванометра был 10 - 20 делений.

2.5 Контрольные вопросы

1) Назовите элементы Земного магнетизма и дайте их определение.

2) Какие существуют методы измерения горизонтальной и вертикальной составляющих напряженности земного магнитного поля? Выведите формулы для расчета H_H , H_V и H .

3) Как измеряется магнитное наклонение?

4) Что такое баллистическая постоянная, каков её физической смысл и метод измерения?

5) Каковы единицы измерения напряженности и индукции магнитного поля в СИ?

6) Сформулируйте закон электромагнитной индукции и выведите формулу для определения заряда, протекающего в контуре, помещенном в изменяющееся магнитное поле.

3 Лабораторная работа

«Определение коэффициента индукции двух соленоидов»

3.1 Цель работы

Определение коэффициента взаимной индукции двух соленоидов с помощью баллистического гальванометра.

3.2 Явление взаимной индукции

Явлением взаимной индукции называется возникновение ЭДС индукции в одном из двух контуров при изменении тока в другом.

Изменение тока в одном контуре вызывает изменение магнитного поля в окружающем пространстве и, следовательно, изменяется магнитный поток Φ , пронизывающий другой контур. В соответствии с законом электромагнитной индукции Фарадея – Ленца изменение магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром, приводит к возникновению ЭДС индукции ε , величина которой пропорциональна скорости изменения этого потока.

$$\varepsilon = -k \frac{d\Phi}{dt}, \quad (18)$$

в СИ $k = 1$, поэтому

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}, \quad (19)$$

Магнитный поток Φ_{21} , пронизывающий контур 2, прямо пропорционален создающему этот поток току I_1 в первом контуре:

$$\Phi_{21} = M_{21} \cdot I_1. \quad (20)$$

Коэффициент M_{21} называется коэффициентом взаимной индукции обоих контуров или, коротко, взаимной индуктивностью.

Если ток во втором контуре I_2 , то магнитный поток Φ_{12} , пронизывающий первый контур, равен:

$$\Phi_{12} = M_{12} \cdot I_2. \quad (21)$$

Опыт и более подробное теоретическое рассмотрение показывает, что для неферромагнитной среды

$$M_{21} = M_{12} = M. \quad (22)$$

Таким образом, коэффициент взаимной индукции двух контуров численно равен магнитному потоку, пронизывающему один из контуров, когда ток в другом контуре равен единице (статическое определение).

Когда ток I в одном контуре изменяется, пропорционально ему изменяется магнитный поток Φ , пронизывающий другой контур, и в последнем возникает ЭДС взаимной индукции:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = -\left(M \frac{dI}{dt} + I \frac{dM}{dt} \right). \quad (23)$$

Если контура неподвижны, не изменяется их форма и магнитная проницаемость сердечника, то $M = \text{const}$, тогда:

$$\varepsilon = -M \frac{dI}{dt}. \quad (24)$$

Следовательно, взаимная индуктивность двух контуров есть величина, численно равная ЭДС индукции, возникающей в одном из них, когда ток в другом изменяется на единицу за единицу времени (динамическое определение). Единица коэффициента взаимной индукции в СИ 1 Генри (1 Гн).

Величина коэффициента взаимной индукции зависит от формы, размеров и взаимного расположения контуров, а также от магнитной проницаемости среды.

Взаимная индуктивность двух соленоидов, намотанных на общий сердечник, в СИ определяется формулой:

$$M = \frac{\mu_0 \mu N_1 N_2 S}{\ell}, \quad (25)$$

где μ_0 – магнитная постоянная;

N_1 и N_2 – число витков первого и второго соленоида;

S – площадь поперечного сечения сердечника;

ℓ – длина сердечника;

μ – относительная магнитная проницаемость сердечника.

Относительная магнитная проницаемость ферромагнетиков является функцией напряженности магнитного поля, в которое он помещен. Следовательно, магнитная проницаемость сердечника трансформатора зависит от числа ампер-витков его первичной обмотки. Поэтому, как правило,

$$M_{21} \neq M_{12}.$$

3.3 Методика определения коэффициента взаимной индукции с помощью гальванометра

3.3.1 Теория метода

Рассмотрим электрическую цепь (рисунок 3.1), состоящую из двух индуктивно связанных соленоидов, источника тока ε и баллистического гальванометра G .

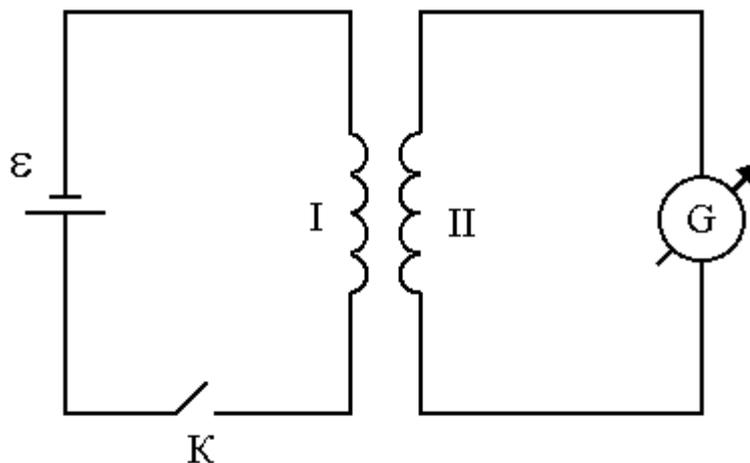


Рисунок 3.1 – Принципиальная электрическая схема для определения коэффициента взаимной индукции

При размыкании первого соленоида ток в нем I_1 прекращается не мгновенно, а уменьшается от максимального значения I_1 до нуля в течение малого, но

конечного промежутка времени Δt . Мгновенное значение силы тока I_2 , возникающего при этом во втором соленоиде, находится по закону Ома:

$$I_2 = \frac{\varepsilon_2}{r_2},$$

где r_2 – активное сопротивление цепи второго контура $r_2 = r_g + r_c$ (r_g – сопротивление баллистического гальванометра, r_c – сопротивление второго соленоида), а ε_2 – мгновенное значение ЭДС индукции, индуцированной во втором соленоиде, равное

$$\varepsilon_2 = -M \frac{dI_1}{dt}.$$

Тогда

$$I_2 = -\frac{M}{r_2} \cdot \frac{dI_1}{dt}. \quad (26)$$

С другой стороны,

$$I_2 = \frac{dq}{dt}, \quad (27)$$

где dq – количество электричества, проходящего через поперечное сечение проводника за время dt .

Из соотношений (26) и (27) получаем:

$$dq = -\frac{M}{r_2} dI_1. \quad (28)$$

Тогда полный заряд q , протекающий через любое сечение второго контура за время прекращения тока в первом контуре, будет равен:

$$q = -\int_{I_1}^0 \frac{M}{r_2} dI_1 = \frac{M \cdot I_1}{r_2}.$$

Откуда

$$M = \frac{qr_2}{I_1}. \quad (29)$$

Для измерения заряда q , протекающего при кратковременных токах, применяют баллистический гальванометр, отклонение подвижной системы которого

пропорционально полному количеству электричества, протекающего через его обмотку, т.е.

$$q = \beta \cdot n_{\max}, \quad (30)$$

де n_{\max} – максимальное отклонение указателя от нулевого положения в делениях шкалы гальванометра,

β – коэффициент пропорциональности, называемый баллистической постоянной гальванометра.

Баллистическая постоянная численно равна количеству электричества, вызывающему отклонение указателя на одно деление шкалы. Баллистическую постоянную обычно выражают в кулонах на деление.

Окончательно получаем для коэффициента взаимной индукции следующее выражение:

$$M = \frac{\beta \cdot n_{\max} \cdot r_2}{I_1}. \quad (31)$$

3.3.2 Порядок выполнения работы

1) Собрать электрическую цепь по схеме рисунка 3.2.

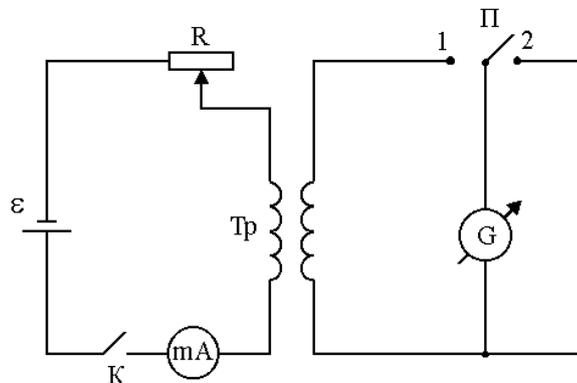


Рисунок 3.2 – Электрическая схема установки

R – высокоомный реостат или магазин сопротивлений; $к$ – ключ; T_p – исследуемый трансформатор с замкнутым сердечником; G – баллистический гальванометр; Π – переключатель; ε – источник тока (выпрямитель).

2) Замкнуть ключ и реостатом или магазином сопротивлений установить ток $\sim 0,5$ мА.

3) Замкнуть переключатель в положение 1 и наблюдать максимальное отклонение указателя гальванометра при размыкании ключа K . Если оно мало, увеличить ток в первичной обмотке, предварительно поставив переключатель в нейтральное положение, и снова наблюдать отброс указателя гальванометра. После коррекции тока записать величину тока и значение максимального отброса указателя.

4) Переключатель П в положении 2 позволяет прекратить колебания зайчика или стрелки гальванометра.

5) Повторить опыт несколько раз при одном и том же значении тока, усреднить значения n_{\max} и оценить погрешность Δn_{\max} .

6) Поменять местами катушки.

7) Снова установить в первичной обмотке такой ток, чтобы при размыкании ключа К отброс указателя гальванометра был наибольшим в пределах шкалы.

8) Собрать цепь по схеме рисунка 3.3.

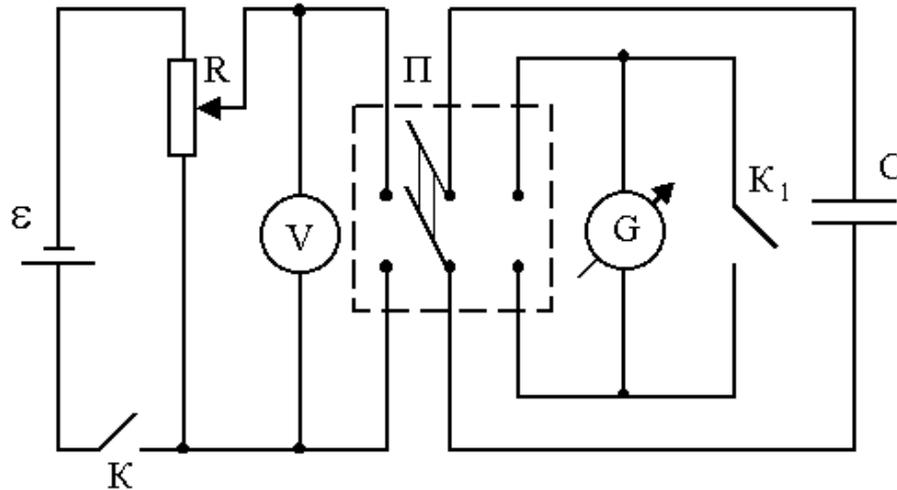


Рисунок 3.3 – Электрическая схема для определения баллистической постоянной гальванометра:

R – реостат; C – конденсатор, П – переключатель,
K₁ – ключ для успокоения гальванометра

9) Определить баллистическую постоянную гальванометра. Для этого зарядить конденсатор известной емкости C (левое положение переключателя П), затем разрядить его через баллистический гальванометр (правое положение переключателя П). При этом измерить максимальный отброс указателя n и напряжение U. Опыт повторить несколько раз. Усреднить значения n и определить Δn .

Определить β по формуле:

$$\beta = \frac{q}{n} = \frac{cU}{n}. \quad (32)$$

Оценить $\frac{\Delta\beta}{\beta}$ и определить $\Delta\beta$.

Для уменьшения погрешности отброс n должен быть наибольшим в пределах шкалы гальванометра.

10) По формуле (31) вычислить коэффициенты взаимной индукции M_1 и M_2 для двух включений обмоток трансформатора и определить ΔM_1 и ΔM_2 .

3.4 Определение коэффициента взаимной индукции методом компенсации ЭДС индукции

3.4.1 Теория метода

Рассмотрим электрическую цепь (рисунок 3.4), состоящую из трех контуров.

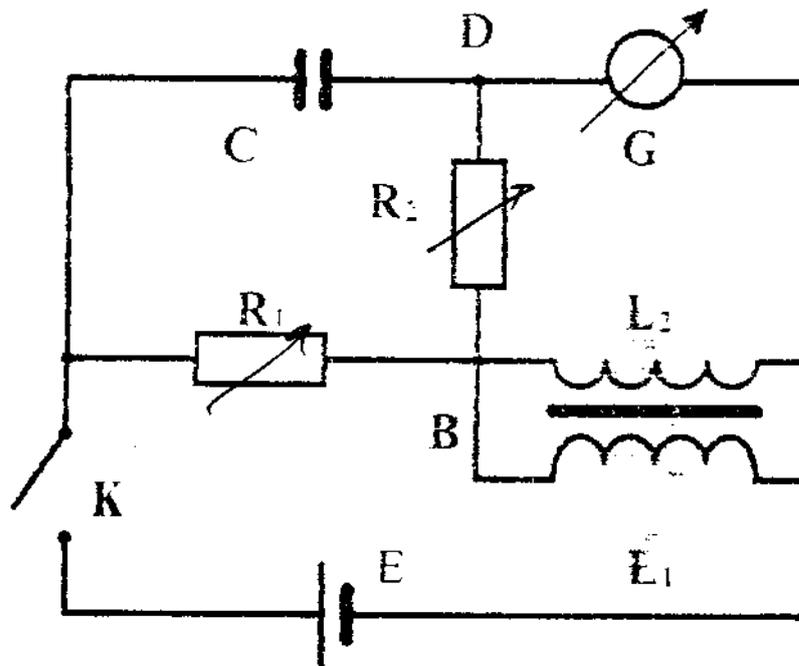


Рисунок 3.4 – Электрическая схема установки

В контур ABEA включены источник постоянного тока E , магазин сопротивлений R_1 и обмотка трансформатора L_1 . В контур BDGB включены магазин сопротивлений R_2 , гальванометр G , вторая обмотка трансформатора L_2 . В контур ACDBA включены конденсатор переменной ёмкости C , магазины сопротивлений R_1 и R_2 .

При замкнутом ключе K в контуре ABEA течет постоянный ток I_1 . В контуре BDGB ток отсутствует. При этом разность потенциалов между точками B и D равна 0, а напряжение на конденсаторе равно падению напряжения на сопротивлении R_1 :

$$U_{AD} = I_1 R_1 \quad (33)$$

Тогда заряд конденсатора равен:

$$q = I_1 R_1 C \quad (34)$$

При размыкании ключа K ток в контуре ABEA убывает от I_1 до 0, поэтому во второй обмотке трансформатора возникает ЭДС взаимной индукции ε_i , равная

$$\varepsilon_i = -M \frac{di_1}{dt}, \quad (35)$$

где $I_1 \geq i_1 \geq 0$

Во время размыкания ключа конденсатор разряжается, i_p – ток разрядки, через гальванометр G и вторичную обмотку L_2 идет ток i_g , а через магазин R_2 – ток i_2 . Тогда по первому закону Кирхгофа для узла D имеем:

$$i_p = i_2 + i_g \quad (36)$$

Применив второй закон Кирхгофа к контуру $BDGB$, получим:

$$\varepsilon_i = i_2 R_2 + i_g (R_g + R_{L2}), \quad (37)$$

где R_g – сопротивление гальванометра, а R_{L2} – сопротивление второй обмотки.

Изменяя емкость конденсатора C и сопротивления R_1 и R_2 , можно добиться, чтобы ток через гальванометр i_g стал равен 0 и $i_2 = i_p$. Тогда выражение (37) примет вид:

$$\varepsilon_i = i_2 R_2. \quad (38)$$

Учитывая, что ЭДС индукции определяется выражением (35), получим:

$$-M \frac{di_1}{dt} = i_2 R_2, \text{ откуда } -M di_1 = R_2 i_2 dt \quad (39)$$

Так как $i_2 = i_p$, а $i_p \cdot dt = dq$, то выражение (39) можно записать в виде:

$$-M di_1 = R_2 dq \quad (40)$$

Решая полученное дифференциальное уравнение (40), имеем:

$$M i_1 = R_2 q \quad (41)$$

Подставив в (41) заряд, определяемый выражением (34), для коэффициента взаимной индукции получим формулу:

$$M = R_1 \cdot R_2 \cdot C \quad (42)$$

3.4.2 Порядок выполнения работы

В работе используются: школьный трансформатор на подставке, выпрямитель, гальванометр с высокой чувствительностью по току, два магазина сопротивлений, конденсатор переменной емкости.

- 1) Собрать рабочую схему.
- 2) Установить предварительно на магазине R_1 сопротивление 1,0 - 1,5 кОм, а на магазине $R_2 \sim 40$ Ом.
- 3) После проверки схемы, включить выпрямитель и установить напряжение на входе не более 8 В, замкнуть ключ К.
- 4) Размыкая ключ К, следить за отклонением стрелки гальванометра. Изменяя сопротивления R_1 и R_2 , добиться отсутствия тока через гальванометр.
- 5) Повторить опыт, поменяв местами обмотки L_1 и L_2 .

3.5 Техника безопасности

- 1) Сборку схемы и все переключения в ней производить при отключенном источнике питания.
- 2) В процессе работы не касаться руками токоведущих частей установки.
- 3) Перед включением схемы убедиться в том, что тумблер «сеть» выпрямителя находится в положении «выкл.», а выходной регулятор напряжения в крайнем левом положении.
- 4) Включение схемы производить только после проверки и с разрешения преподавателя или лаборанта.
- 5) После выполнения работы разобрать схему и привести в порядок рабочее место.

3.6 Контрольные вопросы

- 1) Закон Фарадея для электромагнитной индукции.
- 2) Статическое и динамическое определение коэффициента взаимной индукции.
- 3) От чего зависит коэффициент взаимной индукции двух соленоидов с общим ферромагнитным сердечником? (Вывести формулу 25).
- 4) Сравнить коэффициент взаимной индукции для двух включений катушек M_1 и M_2 . Объяснить различие.
- 5) Электрические схемы для определения M и β .
- 6) Почему для определения M измеряем заряд во вторичной обмотке при выключении тока в первичной обмотке трансформатора?

4 Лабораторная работа

«Исследование взаимодействия двух катушек с током»

4.1 Цель работы

Экспериментальное исследование зависимости силы взаимодействия двух катушек с током от силы тока и расстояния между катушками.

4.2 Основные понятия и законы

На элемент проводника с током в магнитном поле действует сила Ампера:

$$\vec{dF} = I \vec{d\ell} \times \vec{B}, \quad (43)$$

где $I \vec{d\ell}$ – элемент тока;

\vec{B} – индукция магнитного поля.

Вектор силы \vec{dF} перпендикулярен плоскости, в которой лежат вектор элемента тока $I \vec{d\ell}$ и вектор индукции магнитного поля \vec{B} (рисунок 4.1).

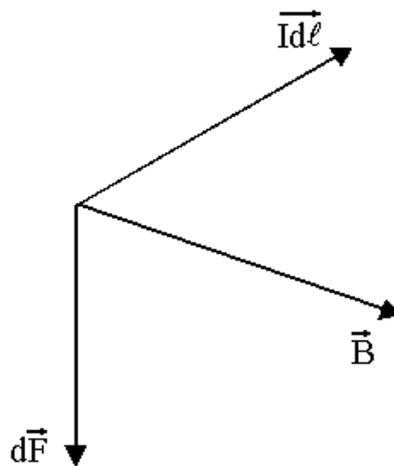


Рисунок 4.1 – Элемент тока в магнитном поле

Модуль силы dF равен:

$$dF = I \cdot d\ell \cdot B \cdot \sin(\angle \vec{I d\ell}, \vec{B}). \quad (44)$$

В однородном магнитном поле модуль силы Ампера F определяется соотношением:

$$F = I \cdot \ell \cdot B \cdot \sin \alpha. \quad (45)$$

Под действием силы Ампера свободный проводник с током может перемещаться в направлении силы. На каждую сторону рамки с током I , плоскость которой перпендикулярна линиям индукции однородного магнитного поля, действуют силы

Ампера (рисунок 4.2) $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3, \vec{F}_4$, расположенные в плоскости рамки и вызывающие деформацию (в данном случае – растяжение).

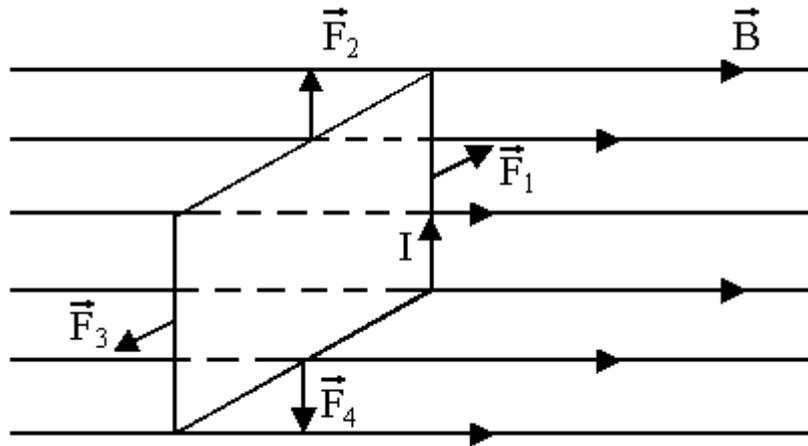


Рисунок 4.2 – Рамка с током в магнитном поле

Если рамка прямоугольная, то силы попарно равны: $F_1 = F_3$, $F_2 = F_4$, и рамка находится в равновесии.

В неоднородном магнитном поле (рисунок 4.3) на каждый элемент $I d\vec{\ell}$ произвольного контура действует сила Ампера $d\vec{F}$, образующая угол β с плоскостью контура.

Составляющая силы, параллельная плоскости контура $d\vec{F}_{\parallel}$, вызывает деформацию контура, а перпендикулярная $d\vec{F}_{\perp}$ – поступательное перемещение (в данном случае в область более сильного поля). Работа перемещения контура под действием результирующей силы $d\vec{F}_{\perp}$ равна:

$$dA = (\vec{F}_{\perp} \cdot d\vec{x}) = F_{\perp} dx. \quad (46)$$

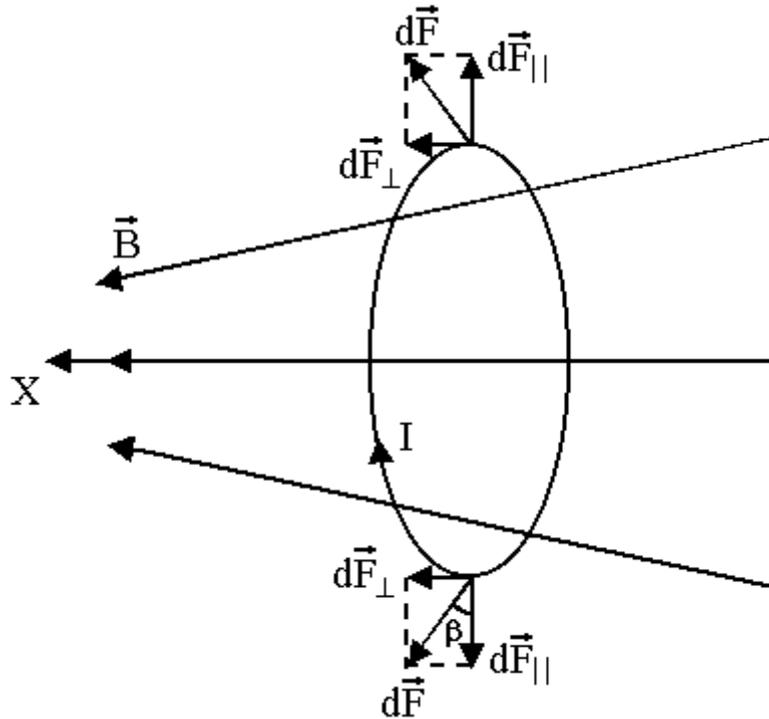


Рисунок 4.3 – Контур с током в неоднородном магнитном поле

Но работа есть мера убыли потенциальной энергии контура в магнитном поле.

$$dA = -dW_p.$$

Потенциальная энергия контура равна:

$$W_p = -(\vec{P}_M \vec{B}) = -P_M B \cos(\vec{P}_M; \vec{B}) = -P_M B_x \quad (47)$$

где P_M – модуль магнитного момента контура, равный, $I \cdot S$ (S – площадь контура).

Тогда F_{\perp} равна:

$$F_{\perp} = \frac{dA}{dx} = \frac{d}{dx}(P_M \cdot B_x) = P_M \frac{dB_x}{dx} = I \cdot S \frac{dB_x}{dx}, \quad (48)$$

где $\frac{dB_x}{dx}$ – градиент продольной составляющей вектора индукции магнитного поля.

4.3 Теория метода

Силу взаимодействия плоских катушек с током (рисунок 4.4) можно определить, используя соотношение (48):

$$F_{12} = I_1 \cdot S_1 \cdot N_1 \frac{dB_{2x}}{dx}, \quad (49)$$

где I_1, S_1, N_1 – сила тока, площадь витка и число витков первой катушки, B_{2x} – проекция вектора индукции магнитного поля, созданного током второй катушки в центре первой катушки.

Модуль индукции магнитного поля можно определить следующим образом. Полный поток Φ_{12} вектора магнитной индукции B_2 , пронизывающий все витки первой катушки, пропорционален силе тока I_2 :

$$\Phi_{12} = M \cdot I_2, \quad (50)$$

где M – коэффициент взаимной индукции катушек при данном их расположении. Его можно выразить также через индукцию магнитного поля B_2 :

$$\Phi_{12} = B_2 \cdot S_1 \cdot N_1. \quad (51)$$

Таким образом, можно записать:

$$B_2 \cdot S_1 \cdot N_1 = M \cdot I_2.$$

откуда

$$B_2 = \frac{M \cdot I_2}{S_1 \cdot N_1}, \quad (52)$$

Подставив B_2 в выражение (49), получим:

$$F_{12} = I_1 \cdot I_2 \frac{dM}{dx}.$$

Если $I_1 = I_2 = I$, то

$$F_{12} = I^2 \frac{dM}{dx}. \quad (53)$$

Величина $\frac{dM}{dx}$ определяет изменение коэффициента взаимной индукции катушек при изменении расстояния между их центрами.

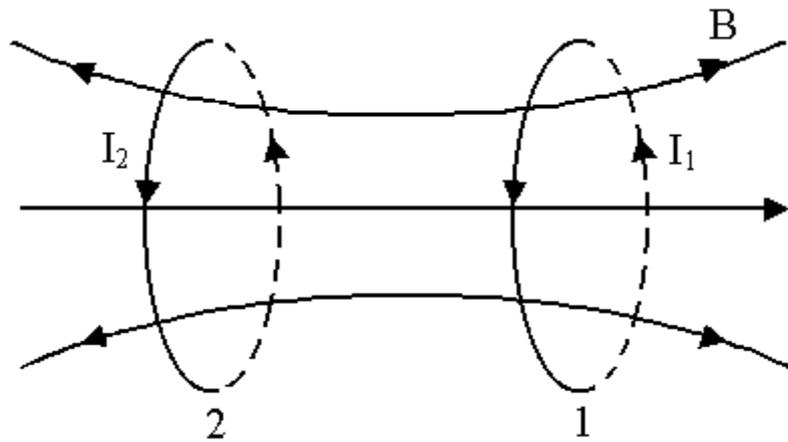


Рисунок 4.4 – Контур с током I_1 в магнитном поле контура с током I_2

4.4 Описание установки

Измерение силы взаимодействия между катушками производится с помощью весов. Катушки располагаются коаксиально (т.е. оси совпадают) на специальной подставке, которую можно закрепить в определенных положениях.

Электрическая цепь составлена по схеме (рисунок 4.5).

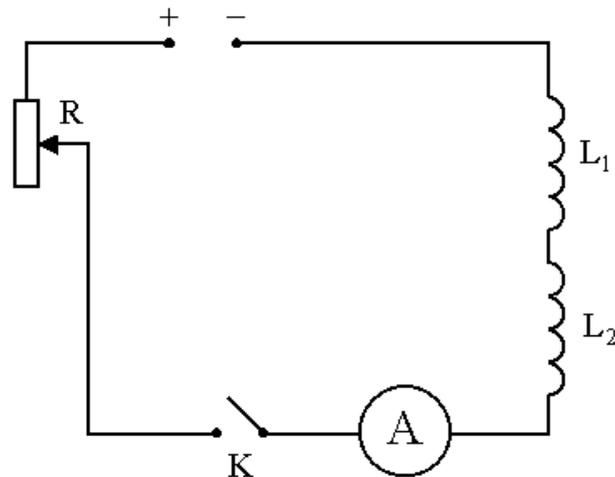


Рис 4.5 – Электрическая схема установки

Расположение катушек приведено на рисунке 4.6.

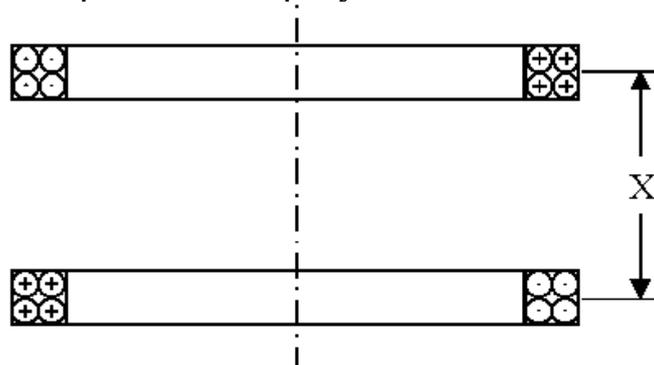


Рисунок 4.6 – Расположение катушек в установке

Для протекания через катушки одинакового по величине тока они соединены последовательно, но расположены так, что их обмотки навиты в противоположных направлениях, поэтому между катушками действует сила отталкивания.

4.5 Порядок выполнения работы

- 1) При разомкнутой цепи уравновесить весы гирьками массой m .
- 2) Добавить разновес массой Δm и при расстоянии X , замкнув цепь, уравновесить весы.
- 3) При данном расстоянии X , увеличивая разновес в 2, 3, 4, 5 раз, уравновесить весы, подбирая силу тока (I_1, I_2, I_3, I_4, I_5).
- 4) При постоянной силе тока I_1 , изменяя расстояние X между катушками, уравновесить весы с помощью разновесов ($X_1 = 3,5$ см, $X_2 = 7$ см, $X = 10,3$ см, $X_4 = 14$ см).
- 5) Результаты опытов записать в таблицу 4.1.

Таблица 4.1

X = 3,5 см			I			$M = \frac{qI_2}{I_1}$
I	m	F	X	m	F	
			3,5			
			7,0			
			10,5			
			14,0			

б) По формуле (53) вычислить величину изменения коэффициента взаимной индукции $dq = -\frac{M}{I_1} dI_1$ и определить абсолютную и относительную погрешности этой величины (для какого-либо среднего расстояния X и средней силы тока I).

7) Построить графики зависимости силы взаимодействия от силы тока $F = F(I)$ при данном расстоянии X_1 , силы взаимодействия от расстояния при постоянной силе тока $F = F(X)$ и зависимости изменения коэффициента взаимной индукции $I_2 = \frac{dq}{dt}$ от расстояния при постоянной силе тока $I_2 = \frac{\epsilon_2}{r_2}$.

4.6 Техника безопасности при проведении работы

- 1) Сборку схемы и все изменения в собранных схемах производить только при отключенном источнике тока.
- 2) До включения схемы на магистине должно быть установлено сопротивление 10×100 Ом, а предел измерения тока на амперметре 6 или 7,5 мА.
- 3) Схему можно включить только после проверки и с разрешения преподавателя или лаборанта.
- 4) Не касаться токоведущих частей установки.
- 5) После выполнения работы привести в порядок рабочее место.

4.7 Контрольные вопросы

- 1) Какая сила действует на проводник с током, помещенный в магнитное поле? Запишите её в скалярной и векторной формах.
- 2) Какие силы действуют на контур с током, расположенный в магнитном поле, если плоскость контура параллельна линиям индукции?
- 3) Как изменится действие магнитного поля на контур с током, если его плоскость перпендикулярна линиям индукции?
- 4) Что произойдет с контуром с током, если его поместить в неоднородное магнитное поле?
- 5) Выведите формулу для определения силы взаимодействия между плоскими катушками с током.
- 6) Каков физический смысл коэффициента взаимной индукции? В каких единицах он измеряется в СИ? От чего зависит коэффициент взаимной индукции контуров?
- 7) Как в данной работе измеряется сила отталкивания между катушками?

5 Лабораторная работа «Определение удельного заряда электрона при помощи магнетрона»

5.1 Цель работы

Изучение движения заряженных частиц в магнитном поле и определение удельного заряда электрона с помощью магнетрона.

5.2 Теория метода

Магнетрон – электронная лампа с накаливаемым катодом, в которой поток электронов управляется одновременно электрическим и магнитным полями.

В качестве магнетрона можно использовать двухэлектродную лампу с цилиндрическим анодом A и прямолинейным катодом K , расположенным на оси анода, помещенную в аксиальное (направленное вдоль оси анода) магнитное поле B (рисунок 5.1). *(над B надо поставить знак вектора)*

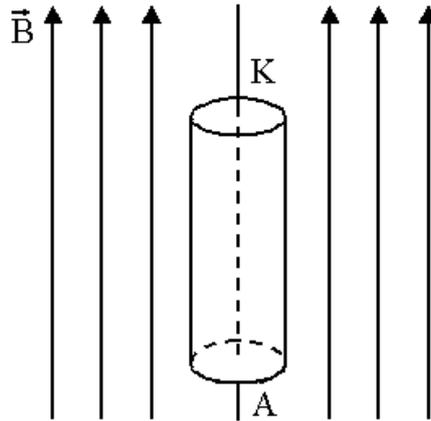


Рисунок 5.1 – Расположение лампы в магнитном поле

При отсутствии магнитного поля электроны, испускаемые раскаленным катодом, под действием электрического поля движутся по радиальным траекториям (рисунок 5.3, а).

Если двухэлектродную лампу поместить в аксиальное магнитное поле (на лампу надеть соленоид), то на движущийся заряд будет действовать сила Лоренца:

$$\vec{F} = -e \cdot \vec{v} \times \vec{B}, \quad F = evB \sin \alpha, \quad (54)$$

где q – заряд частицы;

v – скорость частицы;

B – индукция внешнего магнитного поля;

α – угол между направлением скорости частицы и магнитным полем.

Направление силы Лоренца для положительно заряженной частицы можно определить по правилу левой руки, для электрона ее направление противоположно (рисунок 5.2).

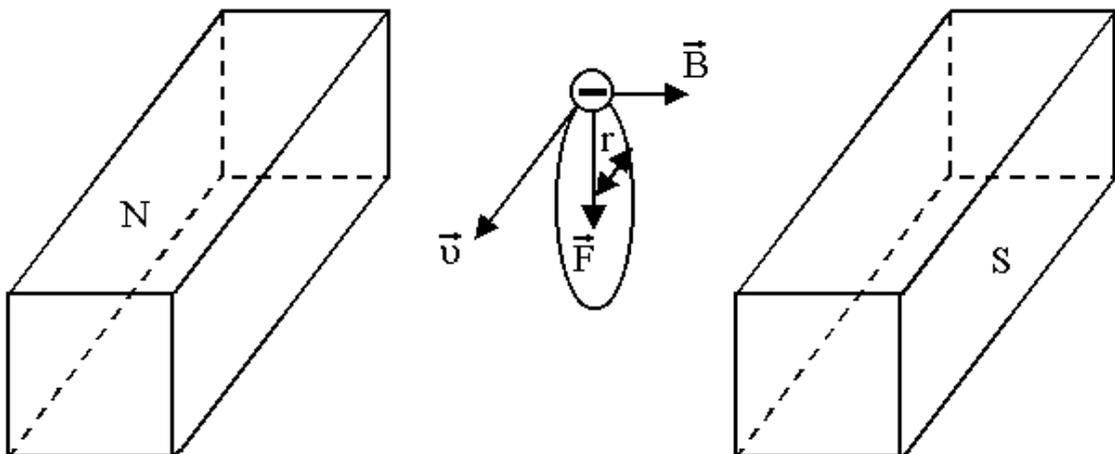


Рисунок 5.2 – Заряженная частица в магнитном поле

Если $\vec{v} \perp \vec{B}$, то $\sin\alpha = 1$, и формула (54) примет вид:

$$F = |q| \cdot v \cdot B. \quad (55)$$

Так как сила, действующая на электрический заряд магнитном поле, всегда перпендикулярна скорости, следовательно, к любому элементу траектории заряженной частицы, то работы она не производит и величину кинетической энергии заряженной частицы не изменяет, а значит, не изменяет и величину ее скорости. Под действием силы Лоренца изменяется траектория движения частицы. В случае, если $\vec{v} \perp \vec{B}$, траектория движения частицы представляет собой окружность, расположенную в плоскости, перпендикулярной вектору индукции магнитного поля \vec{B} . Частица движется по окружности с нормальным ускорением, создаваемым силой Лоренца, равным:

$$a = \frac{v^2}{r}.$$

И, следовательно, выполняется соотношение:

$$|q| \cdot v \cdot B = m \frac{v^2}{r}. \quad (56)$$

Для электрона оно запишется в виде:

$$e \cdot v \cdot B = m \frac{v^2}{r}. \quad (57)$$

Из соотношения (57) можно найти радиус кривизны траектории электрона r :

$$r = \frac{m \cdot v}{e \cdot B} = \frac{v}{\frac{e}{m} \cdot B}, \quad (58)$$

где m – масса электрона;

v – скорость электрона;

B – индукция магнитного поля;

e – заряд электрона;

$\frac{e}{m}$ – удельный заряд электрона.

По мере увеличения индукции магнитного поля траектории электронов будут все более искривляться, и при некотором «критическом» значении индукции магнитного поля электроны перестанут достигать анода и по замкнутым траекториям будут возвращаться обратно на катод С (рисунок 5.3, б, в, г).

При дальнейшем увеличении индукции магнитного поля радиус кривизны траектории электронов будет уменьшаться. За критическое значение индукции магнитного поля принимается то минимальное значение индукции магнитного поля, при котором электроны не будут достигать анода.

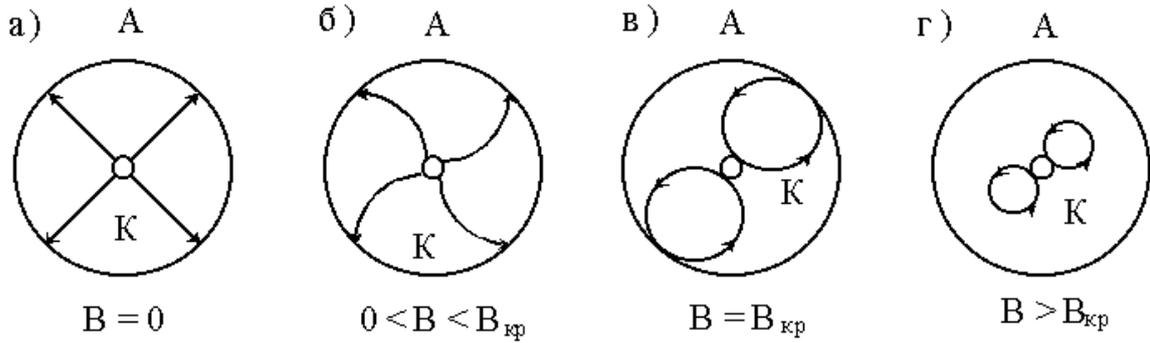


Рисунок 5.3 – Траектории электронов в магнитном поле

При критическом значении индукции магнитного поля радиус кривизны траектории электронов равен:

$$r = \frac{b - r_k}{2}, \quad (59)$$

где b – радиус цилиндра анода.

r_k – радиус нити катода.

Так как нить катода весьма тонка по сравнению с диаметром цилиндра анода, то радиусом катода r_k можно пренебречь, тогда радиус кривизны траектории электронов будет равен половине радиуса анода, т.е.

$$r = \frac{b}{2}. \quad (60)$$

Из формулы (58) можно определить удельный заряд электрона:

$$\frac{e}{m} = \frac{v}{r \cdot B}. \quad (61)$$

Так как при критическом значении индукции магнитного поля

$$r = \frac{b}{2}, \quad \text{то} \quad \frac{e}{m} = \frac{2 \cdot v}{b \cdot B_{кр}}. \quad (62)$$

Скорость электронов можно определить из формулы работы перемещения заряда от катода к аноду. При разности потенциалов между катодом и анодом U_a она равна кинетической энергии электрона, так как начальными скоростями электронов, вылетающих из катода, можно пренебречь:

$$e \cdot U_a = \frac{mv^2}{2}, \quad (63)$$

откуда

$$v = \sqrt{2U_a \frac{e}{m}}. \quad (64)$$

Подставляя это выражение скорости в формулу (62), получим:

$$\frac{e}{m} = \frac{8 \cdot U_a}{B_{кр}^2 b^2}. \quad (65)$$

Аксиальное магнитное поле создается соленоидом, внутри которого помещается электронная лампа. Индукция магнитного поля соленоида конечной длины в СИ равна:

$$B = \frac{\mu\mu_0 \cdot I_c \cdot N}{2L} (\cos\beta_1 - \cos\beta_2), \quad (66)$$

где B – индукция магнитного поля в некоторой точке на оси соленоида;

μ – магнитная проницаемость среды (для вакуума $\mu = 1$);

μ_0 – магнитная проницаемость вакуума (в СИ $\mu_0 = 1,3 \cdot 10^{-6}$ Гн/м);

I_c – сила тока, протекающего по соленоиду;

N – число витков соленоида;

L – длина соленоида;

β_1, β_2 – углы, под которыми из точки (в этой точке определяется напряженность) видны радиусы крайних витков соленоида (рисунок 5.4).

5.3 Описание установки

Принципиальная схема установки изображена на рисунке 5.5. Она состоит из трех электрических цепей: анодной цепи, цепи катода и цепи соленоида. Анодная цепь состоит из вольтметра V , миллиамперметра A_1 , электронной лампы и питается от источника постоянного тока Π_1 .

Цепь катода состоит из реостата R , амперметра A_2 катода K и питается от источника постоянного тока Π_2 .

Цепь соленоида состоит из соленоида L , амперметра A_3 и питается от источника постоянного тока Π_3 . Источники Π_1, Π_2, Π_3 – источники с регулируемым напряжением.

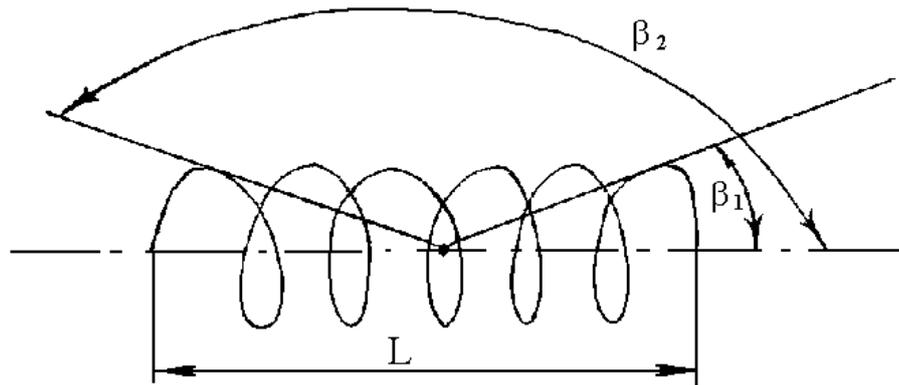


Рисунок 5.4 – Положение точки внутри соленоида, где определяется индукция поля B

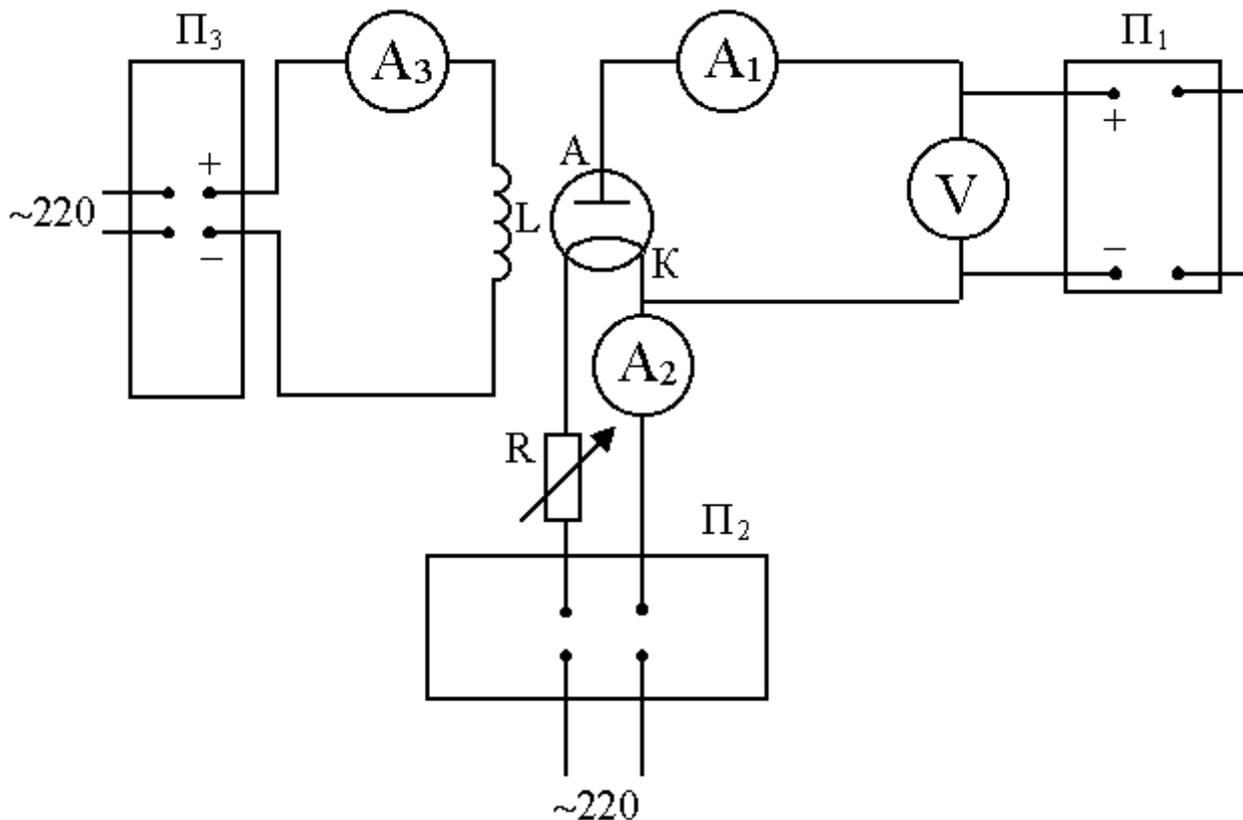


Рисунок 5.5 – Электрическая схема установки

Соленоид L условно изображен на схеме рядом с лампой, в действительности же, как указывалось выше, лампа находится внутри соленоида.

5.4 Порядок выполнения работы

- 1) Собрать установку по схеме в соответствии с рисунком 5.5.
- 2) Потенциометры источников питания Π_1 , Π_2 , Π_3 установить в положение минимального напряжения.
- 3) После проверки преподавателем схемы включить источник питания Π_2 в цепи катода. Спустя 1 ÷ 2 минуты после включения цепи катода (время, нужное

для прогрева катода) установить ток накала, указанный преподавателем (ток накала поддерживать постоянным).

4) Установить потенциометром источника питания Π_1 такое напряжение, чтобы стрелка миллиамперметра A_1 в цепи анода установилась на одном из последних делений. Это значение анодного напряжения U_a занести в таблицу 5.2.

5) Включить цепь соленоида и потенциометром источника Π_3 увеличивать силу тока I_c через 0,1 А. Записывая показания амперметра A_1 , одновременно следить за изменением силы тока в анодной цепи I_a по миллиамперметру A_1 . Значение силы тока I_c и соответствующие значения силы тока I_a занести в таблицу 5.1.

Таблица 5.1

I_c, A	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3
I_a, mA														
$\Delta I_a, \text{mA}$														

В третью строку таблицы 5.1 записывают разность ΔI_a двух соседних отсчетов анодного тока I_a , соответствующих двум соседним значениям тока соленоида I_c .

Величина ΔI_a характеризует крутизну спадания анодного тока под действием магнитного поля, создаваемого током соленоида. Наибольшая величина спадания анодного тока ΔI_a соответствует критическому току соленоида $I_{c \text{ кр}}$. Значение $I_{c \text{ кр}}$ берется из первой строки таблицы 5.1 соответствующее максимальному значению $\Delta I_{a \text{ max}}$ третьей строки таблицы 5.1.

Наглядное представление определения $I_{c \text{ кр}}$ дает график зависимости $\Delta I_a = f(I_c)$, построенный по данным таблицы 5.1 (рисунок 5.6).

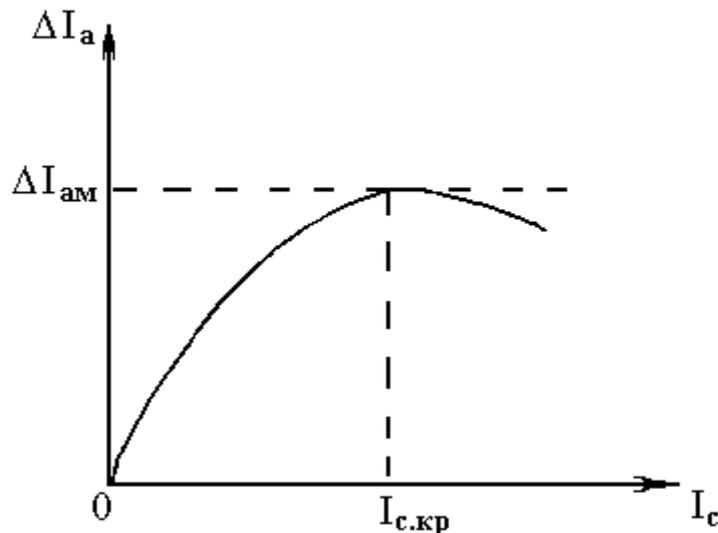


Рисунок 5.6 – График зависимости изменения анодного тока от тока в соленоиде

6) По формуле (66) вычислить значение $V_{кр}$, подставляя вместо I_c значение $I_{c\text{ кр}}$. Число витков соленоида N длина соленоида L , значение $\cos\beta_1 - \cos\beta_2$ приведено на приборе.

7) Подставив в формулу (65) найденное значение $V_{кр}$ и численные значения величин U_a и b , определить удельный заряд электрона $\frac{e}{m}$ (b для анода указано на приборе).

В расчетные формулы (65) и (66) численные значения всех величин нужно подставлять в единицах СИ.

8) По полученным данным, пользуясь формулой (64), вычислить скорость электрона v , зная заряд электрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кулон, массу электрона m . Результаты измерений и вычислений записать в таблицу 5.2.

Таблица 5.2

U_a , В	$I_{c\text{ кр}}$, А	N	L , м	$V_{кр}$, Тл	b , м	$\frac{e}{m}$, Кл/кг	v , м/с	m , кг	$d_{ср}$, м

5.5 Техника безопасности

1) Включение установки производится только после проверки схемы преподавателем или лаборантом.

2) Во время работы запрещается касаться токоведущих частей установки.

3) По окончании работы уменьшить анодное напряжение, напряжение накала и соленоида до нуля и отключить источники питания от сети.

5.6 Контрольные вопросы

1) Какое действие оказывает магнитное поле на движущуюся заряженную частицу?

2) Как определяется величина и направление силы Лоренца?

3) Какова траектория движения электрона в магнитном поле?

4) Вывести формулу радиуса кривизны траектории электрона, индукции магнитного поля соленоида и рабочую формулу для определения $\frac{e}{m}$.

6 Лабораторная работа «Определение удельного заряда электрона методом фокусировки электронного пучка продольным магнитным полем»

6.1 Цель работы

Определение удельного заряда электрона методом фокусировки слабо расходящегося электронного пучка продольным магнитным полем.

6.2 Теория метода

Заряд и масса электрона являются основными классическими константами. Масса электрона очень мала, однако, она сказывается в тех случаях, когда ему сообщают ускорение под действием электрических и магнитных полей. Поэтому все методы определения удельного заряда электрона основаны на изучении его движения в электрическом и магнитном полях.

Одним из точных методов определения $\frac{e}{m}$ является метод, связанный с применением продольного магнитного поля.

На электрон со стороны магнитного поля действует сила Лоренца:

$$\vec{F} = -e \cdot \vec{v} \times \vec{B}, \quad F = evB \sin \alpha, \quad (67)$$

где e – заряд электрона;

v – скорость электрона;

B – индукция магнитного поля;

α – угол между вектором скорости электрона и вектором индукции магнитного поля.

Если электрон влетает в магнитное поле под углом α , не равным 0 или 90° , к направлению магнитных силовых линий, то его скорость можно разложить на две составляющие (см. рисунок 6.1).

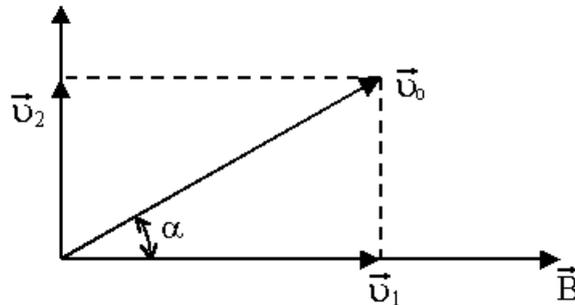


Рисунок 6.1 – Составляющие вектора скорости:

$v_1 = v_0 \cdot \cos \alpha$ – продольная составляющая;

$v_2 = v_0 \cdot \sin \alpha$ – поперечная составляющая

Тогда сила Лоренца, действующая на электрон, будет равна:

$$F = e \cdot v_2 \cdot B$$

Сила Лоренца перпендикулярна вектору индукции магнитного поля \vec{B} и скорости электрона \vec{v}_0 и создает центростремительное ускорение:

$$a = \frac{v_2^2}{r}.$$

И так как существует продольная составляющая скорости v_1 , то движение электрона будет происходить по винтовой траектории (рисунок 6.2), шаг которой ℓ и радиус r .

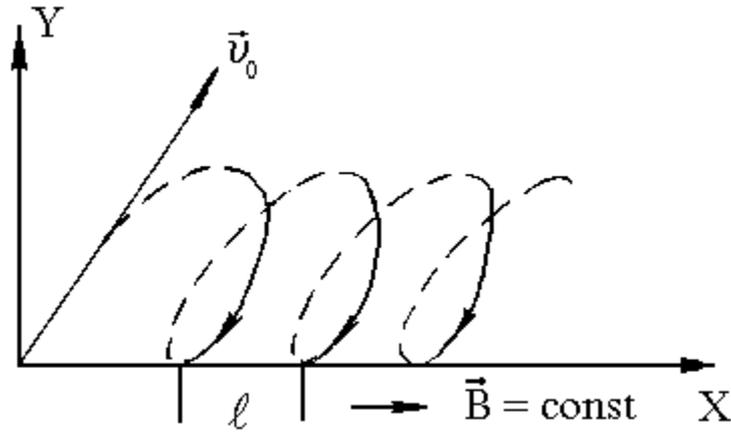


Рисунок 6.2 – Траектория движения электрона

Радиус траектории определяется из соотношения:

$$e \cdot v_2 \cdot B = \frac{m v_2^2}{r}. \quad (68)$$

Откуда

$$r = \frac{v_2}{\frac{e}{m} \cdot B} = \frac{v_0 \sin \alpha}{\frac{e}{m} \cdot B}. \quad (69)$$

Период движения по винтовой траектории (время одного оборота) равен:

$$T = \frac{2\pi \cdot r}{v_2} = \frac{2\pi \cdot v_0 \sin \alpha}{\frac{e}{m} \cdot B \cdot v_0 \sin \alpha} = \frac{2\pi}{\frac{e}{m} \cdot B}. \quad (70)$$

Шаг винтовой траектории ℓ определяется расстоянием, которое пройдет электрон вдоль силовых линий магнитного поля (вдоль оси соленоида) за один период:

$$\ell = v_1 \cdot T = \frac{v_0 \cdot \cos \alpha \cdot 2\pi}{\frac{e}{m} \cdot B}. \quad (71)$$

Когда угол α мал, то $\cos \alpha \approx 1$, и формула (71) примет вид:

$$\ell = v_1 \cdot T = \frac{v_0 \cdot 2\pi}{\frac{e}{m} \cdot B}. \quad (72)$$

Если из точки 0 под небольшими углами к оси X вылетает несколько электронов, то они будут двигаться по винтовым траекториям, различно

ориентированным относительно прямой OX , являющейся осью пучка (рисунок 6.3).

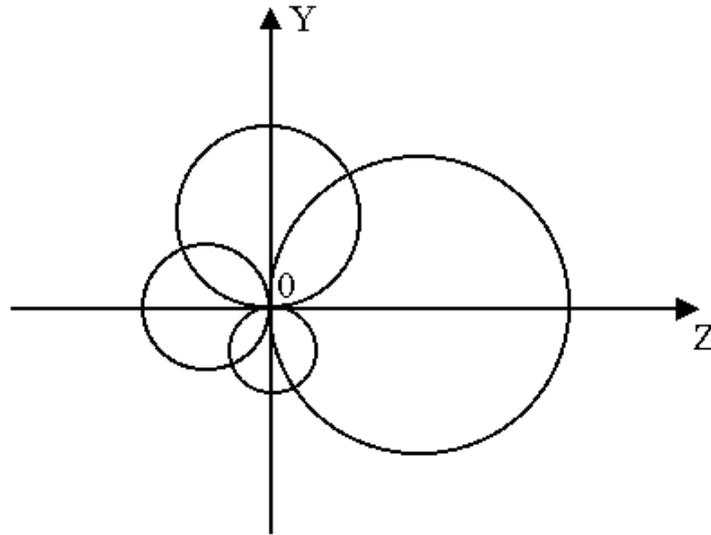


Рисунок 6.3 – Проекция траектории электронов на плоскость, перпендикулярную \vec{B}

Чтобы не загромождать рисунок, на нем изображены только витки траекторий электронов, спроектированные на плоскость, перпендикулярную оси X . Если магнитное поле цилиндрически симметрично, источник электронов расположен на оси OX и угол α для всех электронов достаточно мал, то шаг винтовой линии для разных электронов будет практически одинаковым.

Появляется возможность собрать различные электроны приблизительно в одну точку, т.е. сфокусировать электронный пучок.

Если расстояние между источником электронов O и экраном кратно шагу винтовой линии, то все электроны, выходящие из точки O с одной и той же абсолютной величиной скорости v_0 под малыми углами к оси X , попадут в одну точку пересечения оси OX с экраном.

Это фокусирующее действие соленоида и лежит в основе метода продольного магнитного поля.

6.3 Описание установки

Главной частью установки является электронно-лучевая трубка, помещенная внутри соленоида. Принципиальная схема ее включения приведена на рисунке 6.4. Электроны, испускаемые раскаленным катодом K , под действием электрического поля движутся по направлению к аноду A и дальше в виде расходящегося пучка к экрану трубки. Если напряжение между анодом и катодом достаточно высокое, то скорость электронов v_0 зависит от анодного напряжения U :

$$eU = \frac{mv_0^2}{2}. \quad (73)$$

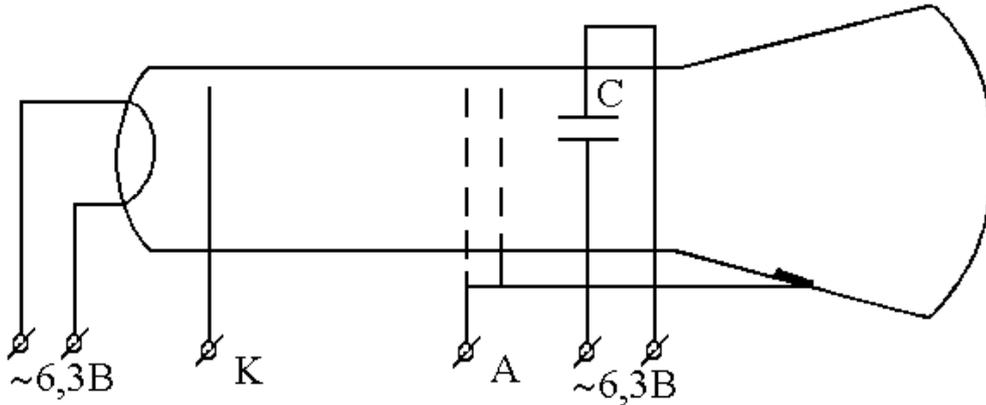


Рисунок 6.4 – Принципиальная схема включения электронно-лучевой трубки

Расходящийся пучок электронов попадает внутрь соленоида (рисунок 6.5).

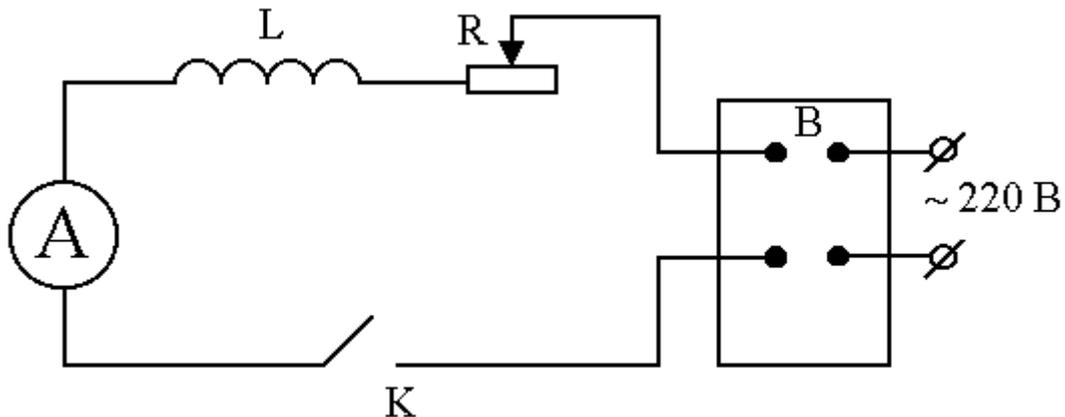


Рисунок 6.5 – Электрическая схема включения соленоида

При пропускании тока по соленоиду возникает магнитное поле, вектор индукции которого параллелен его оси и равен:

$$B = \mu \cdot \mu_0 \cdot I \cdot n, \quad (74)$$

где n – число витков на единице длины соленоида,

I – ток соленоида,

μ_0 – магнитная постоянная,

μ – магнитная проницаемость среды.

Под действием магнитного поля электроны пучка начинают двигаться по винтовым линиям и пересекают ось прибора в точке, называемой фокусом. Соответствующим подбором тока в соленоиде можно добиться того, чтобы фокус пришелся как раз на экран трубки. Тогда l равно длине свободного пробега электрона и может быть измерено. Зная величину индукции магнитного поля,

можно найти $\frac{e}{m}$. Из (72) получаем:

$$\frac{e}{m} = \frac{2\pi \cdot v_0}{l \cdot B}. \quad (75)$$

Выражая v_0 из (73) и V из (74) и подставляя в уравнение (75), получим окончательную формулу для расчета $\frac{e}{m}$:

$$\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2 \cdot U}{\ell^2 \cdot \mu^2 \cdot \mu_0^2 \cdot I^2 \cdot n^2}, \quad (76)$$

так как внутри трубки вакуум, то $\mu = 1$.

6.4 Порядок выполнения работы

- 1) Собрать схему установки.
- 2) Включить накал нити катода трубки.
- 3) Установить по вольтметру анодное напряжение (в пределах от 800 до 1000 В). Дождаться, когда на экране появится светящееся пятно.
- 4) Замкнуть ключ K в цепи соленоида и реостатом R подобрать такую силу тока, чтобы электронный пучок оказался сфокусированным. Записать величину тока.

- 5) Вычислить $\frac{e}{m}$ для трех значений напряжения и его среднее значение.

Значение величин ℓ и n даны на панели прибора.

- 6) Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 6.1.

Таблица 6.1

$U, \text{В}$	$\ell, \text{м}$	$I, \text{А}$	$\frac{e}{m}, \text{Кл/кг}$	$\Delta \frac{e}{m}, \text{Кл/кг}$	$\left\langle \Delta \frac{e}{m} \right\rangle$
---------------	------------------	---------------	-----------------------------	------------------------------------	---

6.5 Техника безопасности

- 1) Включение установки производится только после проверки схемы преподавателем или лаборантом.
- 2) Во время работы запрещается касаться токоведущих частей установки.
- 3) По окончании работы уменьшить анодное напряжение, накала и соленоида до нуля и отключить источники питания от сети.

6.6 Контрольные вопросы

- 1) Какое действие оказывает магнитное поле на движущуюся заряженную частицу?
- 2) Как определяется величина и направление силы Лоренца?
- 3) Какова траектория движения электрона в магнитном поле?

4) Вывести формулу радиуса кривизны и шага винтовой траектории электрона, индукции магнитного поля соленоида и рабочую формулу для определения $\frac{e}{m}$.

7 Лабораторная работа «Снятие кривой намагничивания и петли гистерезиса с помощью осциллографа»

7.1 Цель работы

Построение кривой намагничивания и определение тепловых потерь.

7.2 Основные понятия

Вещества, способные изменять магнитное поле, называют магнетиками. Магнитные свойства вещества обусловлены наличием магнитных моментов электронов, входящих в оболочку атома, и нуклонов ядра. По сравнению с магнитными моментами электронов магнитные моменты нуклонов значительно меньше и при определении магнитного момента атома их можно не учитывать.

Магнитный момент атома равен векторной сумме орбитальных и собственных моментов электронов. В зависимости от структуры атома он может быть различным, в том числе и равным нулю. В отсутствие внешнего магнитного поля магнитные моменты атомов вещества расположены хаотически (за исключением магнитоупорядоченных веществ), поэтому суммарное магнитное поле атомов равно нулю.

Под действием внешнего магнитного поля магнитные моменты атомов стремятся расположиться по направлению вектора напряженности магнитного поля. Ориентирующему действию внешнего магнитного поля противодействует хаотическое тепловое движение частиц вещества.

Для характеристики состояния намагничивания вещества вводится вектор намагничивания (намагниченность) \vec{J} , численно равный суммарному магнитному моменту единицы объема вещества:

$$\vec{J} = \frac{\sum_{i=1}^N \vec{P}_{\text{ма}}}{V}. \quad (77)$$

Вектор намагничивания \vec{J} зависит от напряженности магнитного поля, рода вещества и состояния, в котором оно находится:

$$\vec{J} = \chi \vec{H}. \quad (78)$$

Коэффициент χ называют магнитной восприимчивостью магнетика. Магнитная восприимчивость безразмерная величина, равная отношению модуля вектора намагничивания к модулю вектора напряженности магнитного поля. Значение магнитной восприимчивости у разных веществ различно по величине и знаку. Все

магнетики делятся на три класса: диамагнетики (у них $\chi < 0$), парамагнетики ($\chi > 0$, но $\chi \ll 1$) и магнитоупорядоченные вещества ($\chi > 0$ и может быть $\chi \gg 1$).

Магнитное поле внутри магнетика складывается из двух полей: внешнего и внутреннего. Результирующее поле в магнетике характеризуется вектором магнитной индукции \vec{B} , равным сумме вектора магнитной индукции внешнего \vec{B}_0 и внутреннего $\vec{B}_{\text{вн}}$ магнитных полей:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_{\text{вн}} \quad (79)$$

\vec{B}_0 вектор индукции внешнего магнитного поля может быть выражен через напряженность магнитного поля: $\vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H}$; внутреннее – через вектор намагничения $\vec{B}_{\text{внутр}} = \mu_0 \vec{J}$ или, учитывая (78), $\vec{B}_{\text{внутр}} = \mu_0 \chi \vec{H}$. Таким образом, вектор \vec{B} равен:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \chi \vec{H} = \mu_0 (1 + \chi) \vec{H} = \mu_0 \mu \vec{H}, \quad (80)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м;

$1 + \chi$ – магнитная проницаемость магнетика.

7.3 Классификация магнетиков

Как отмечалось в 7.2, все магнетики делятся на три класса: диамагнетики, парамагнетики и магнитоупорядоченные магнетики.

К диамагнетикам относятся вещества, атомы которых в отсутствие внешнего магнитного поля не обладают магнитным моментом. Действие внешнего магнитного поля приводит к изменению орбитального движения электронов атома и возникновению дополнительного магнитного момента, направленного против поля:

$$\Delta \vec{p}_{\text{ме}} = -\frac{e^2 z \langle S_{\perp} \rangle}{4\pi m} \vec{B}_0, \quad (81)$$

где e – заряд электрона;

m – масса электрона;

$\langle S_{\perp} \rangle$ – средняя площадь проекции орбит электронов атома на плоскость, перпендикулярную полю;

z – порядковый номер элемента в таблице Менделеева.

У изотропного диамагнетика в однородном магнитном поле наведенный магнитным полем дополнительный магнитный момент одинаков у всех атомов, поэтому вектор намагничения определяется соотношением:

$$\vec{J} = n \Delta \vec{p}_{\text{ме}} = -\frac{e^2 n z \langle S_{\perp} \rangle}{4\pi m} \vec{B}_0. \quad (82)$$

И, следовательно, магнитная восприимчивость диамагнетика равна:

$$\chi = -\frac{ne^2z\langle S_{\perp} \rangle}{4\pi m} \mu_0. \quad (83)$$

Абсолютное значение магнитной восприимчивости мало $\sim 10^{-6}$, поэтому магнитная проницаемость диамагнетиков практически равна 1.

Диамагнетиками являются инертные газы, азот, вода, серебро, висмут и т.д. Дополнительный магнитный момент возникает у атомов любых веществ, но он настолько мал, что проявляет себя только у веществ, атомы которых не обладают магнитным моментом в отсутствие внешнего магнитного поля.

Парамагнетики – вещества, магнитный момент атомов или молекул которых в отсутствие поля имеет определенное, не равное нулю, значение. Однако в обычных условиях магнитные моменты атомов ориентированы хаотически и суммарный магнитный момент любого макроскопического объема вещества равен нулю, вещество не намагничено. При наличии внешнего магнитного поля ориентация магнитных моментов вдоль поля становится энергетически более выгодной. Но при обычных, например, комнатных температурах и небольших полях энергия теплового движения атомов намного превышает взаимодействие моментов с полем, поэтому парамагнитная намагниченность мала. При понижении температуры она растет обратно пропорционально абсолютной температуре вещества. Примером парамагнитных веществ являются кислород, алюминий, платина, хлористое железо и т.п., а также все магнитоупорядоченные вещества, если их нагреть до некоторой температуры (температуры Кюри для ферромагнетиков).

К классу магнитоупорядоченных веществ относятся вещества, магнитные моменты атомов которых располагаются в определенном порядке. Такое упорядочение вызвано силами электрического происхождения, которые называются обменными силами. Обменные силы могут устанавливать атомные магнитные моменты как параллельно, так и антипараллельно. Осуществляется та ориентация магнитных моментов, которая является энергетически наиболее выгодной, т.е. для которой энергия обменного взаимодействия минимальна.

Если все магнитные моменты под действием обменных сил устанавливаются параллельно друг другу, такая магнитная структура называется ферромагнитной (рисунок 7.1,а). Железо, никель, кобальт, многие редкоземельные металлы и их сплавы в определенной области температур являются ферромагнетиками.

В некоторых случаях обменные силы приводят к возникновению так называемой антиферромагнитной структуры, когда в некотором атомном слое вещества все магнитные моменты выстроены параллельно друг другу, а в соседнем слое направлены противоположно магнитным моментам первого слоя (рисунок 7.1, б). В этом случае магнитную решетку вещества можно представить как бы состоящей из двух магнитных подрешеток, имеющих равные, но противоположно направленные магнитные моменты. Антиферромагнетиками являются металлы (Mn, Cr, Nd, Eu), многие окислы (MnO, NiO, CoO, FeO), фториды и карбонаты переходных металлов и т.д.

Вещества, которые можно представить состоящими из двух (или более) магнитных подрешеток, имеющих антипараллельные, но не равные магнитные моменты, называют нескомпенсированными антиферромагнетиками или ферритами (рисунок 7.1, в). Ферримагнетиками являются магнетит Fe_3O_4 , известный еще в глубокой древности, другие двойные окислы переходных металлов. Ферриты, будучи окисными полупроводниковыми соединениями с высоким электрическим сопротивлением, нашли широкое применение в технике. Возможны и другие, более сложные структуры магнитоупорядоченных веществ. В настоящее время насчитывается более 20 000 магнитоупорядоченных веществ, и число их все возрастает.

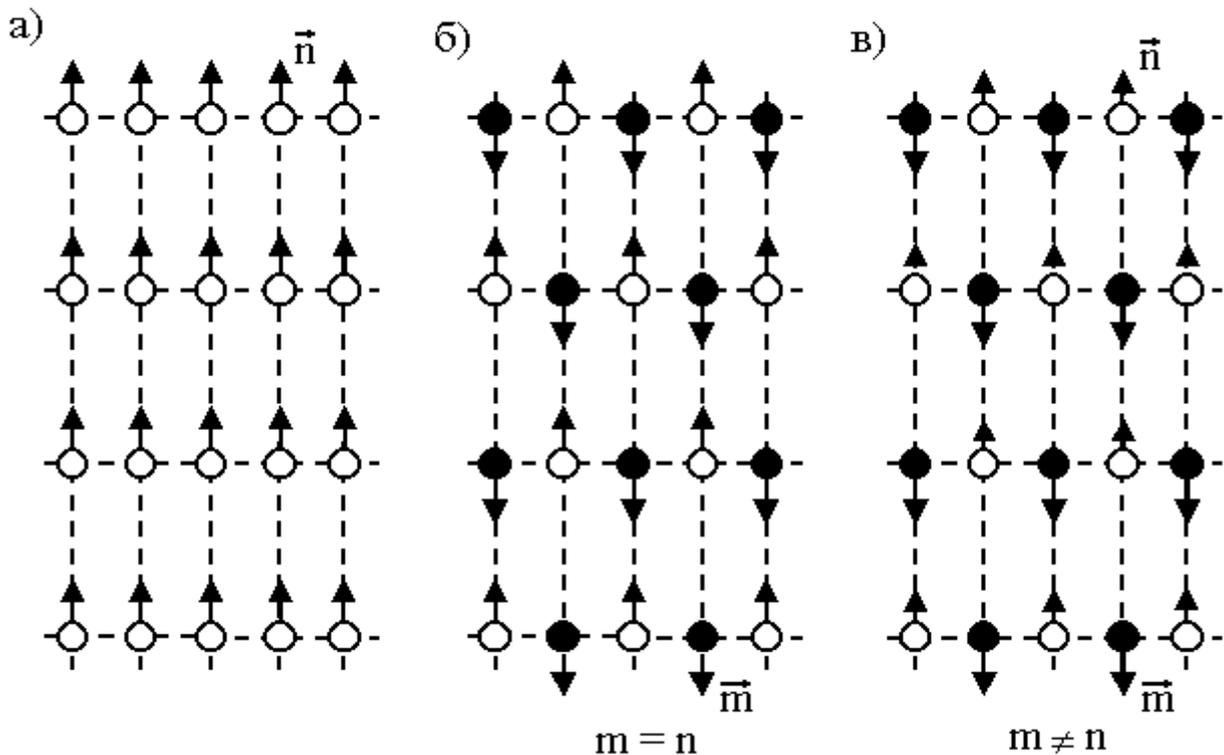


Рисунок 7.1 – Некоторые типы магнитных структур

При нагревании магнитоупорядоченного вещества усиливается тепловое движение атомов, и при некоторой температуре T_k происходит разрушение магнитного порядка. Выше этой температуры магнитоупорядоченные вещества ведут себя как обычные парамагнетики, магнитная восприимчивость которых подчиняется закону Кюри-Вейсса:

$$\chi = \frac{C}{T - T_k},$$

где C – некоторая постоянная вещества.

В случае ферромагнетика температура T_k называется температурой Кюри или точкой Кюри. Аналогично для антиферромагнетиков температура, при которой исчезает антипараллельная ориентация магнитных моментов, называется антиферромагнитной точкой Кюри или точкой Нееля (T_N).

При охлаждении вещества ниже данной температуры в нем вновь возникает магнитный порядок. Значение температуры T_k у различных материалов различно. Например, у никеля $T_k = 631$ К, у железа – 1043 К, а температура Кюри гадолиния равна 292 К.

Как уже было сказано, к ферромагнетикам относятся вещества, магнитные моменты атомов которых устанавливаются параллельно друг другу. Оказывается, однако, что такое расположение атомных магнитных моментов является энергетически невыгодным. Более выгодным является разбиение ферромагнитного образца на области, в каждой из которых магнитные моменты ориентированы параллельно друг другу, т.е. суммарный магнитный момент такой области не равен нулю. Такие области принято называть доменами. Магнитный же момент немагниченного ферромагнетика будет равен нулю из-за различной ориентации магнитных моментов этих областей. Благодаря делению на домены магнитные силовые линии в размагниченном материале замыкаются, почти не выходя наружу (рисунок 7.2). Такой материал внешне не проявляет магнитных свойств.

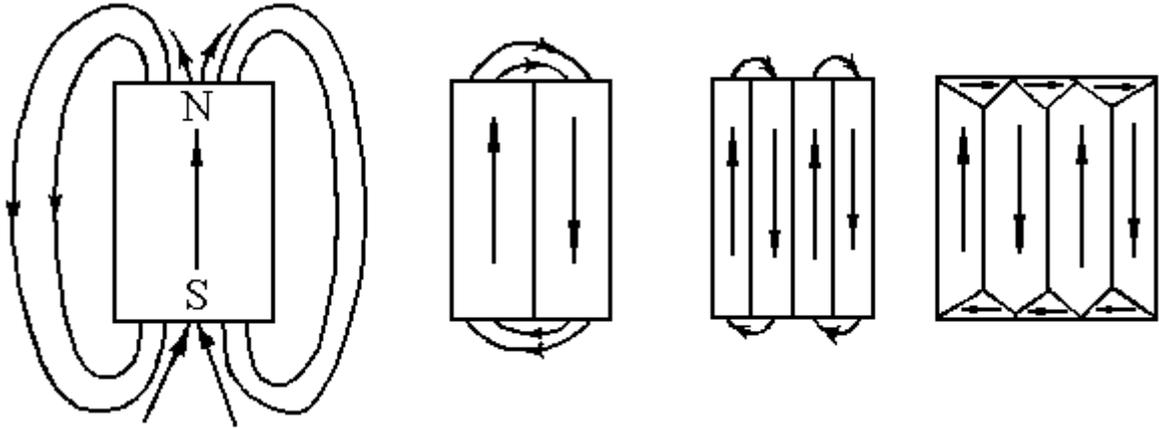


Рисунок 7.2 – Разбиение ферромагнитного образца на домены

Домены разделены переходными слоями – доменными границами. Если поместить предварительно размагниченный ферромагнитный образец в возрастающее магнитное поле, намагниченность \vec{J} и индукция \vec{B} будут изменяться. Вектор магнитной индукции является силовой характеристикой магнитного поля и в данном случае определяет его величину внутри магнетика. Кривая, которая показывает рост намагниченности \vec{J} магнетика в зависимости от напряженности внешнего поля \vec{H} , называется начальной или основной кривой намагничивания (рисунок 7.3, а). Эта кривая имеет довольно сложный характер.

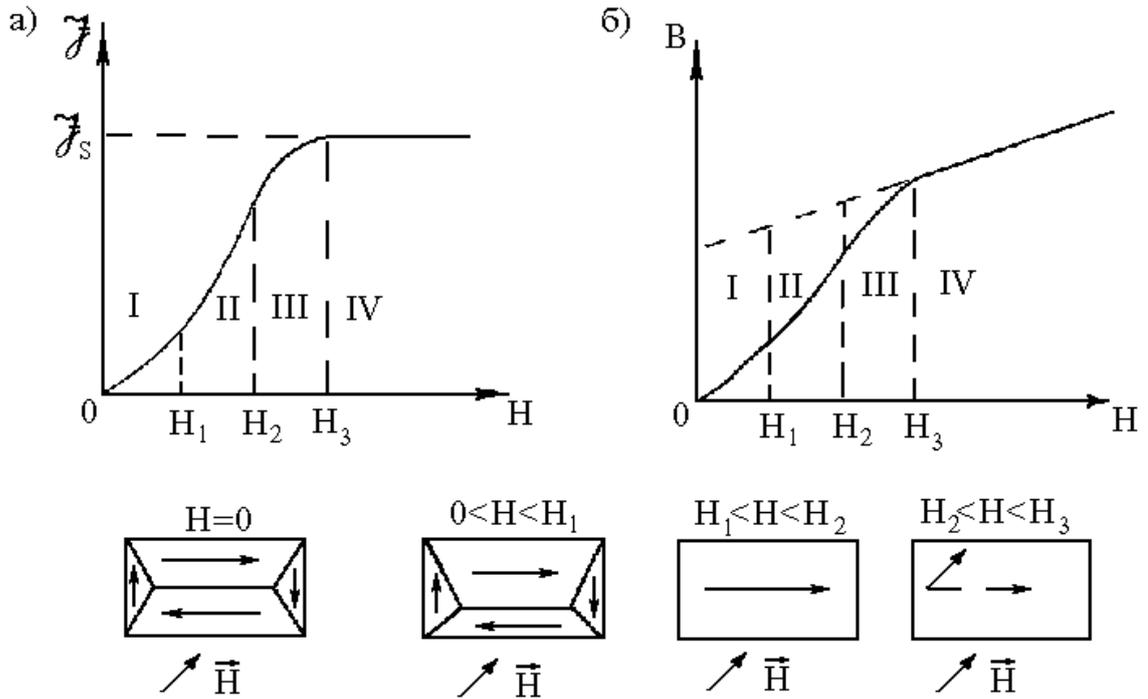


Рисунок 7.3 – Основная кривая намагничивания ферромагнетика

На участке I намагничивание осуществляется за счет обратимого смещения доменных границ, и происходит рост одних доменов за счет других. Участок II кривой намагничивания соответствует необратимому смещению доменных границ. На участке III процессы смещения доменных границ уже в основном закончены, и намагничивание осуществляется путем поворота векторов магнитных моментов в направлении магнитного поля. При совпадении направления магнитных моментов и поля образец достигает так называемого технического насыщения J_s . Если теперь начать уменьшать магнитное поле, намагниченность не вернется к нулю по начальной кривой намагничивания (рисунок 7.4).

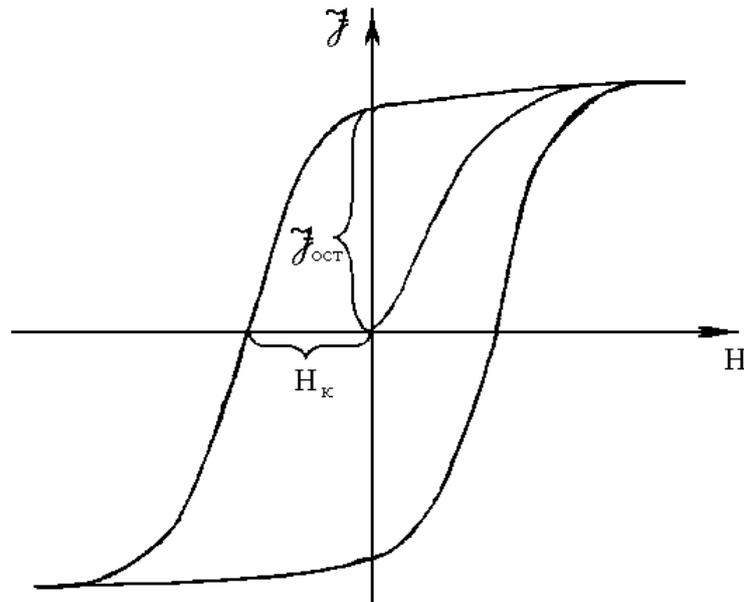


Рисунок 7.4 – Петля гистерезиса при перемагничивании ферромагнетика

Новая кривая пройдет выше прежней и пересечет вертикальную ось при $H = 0$ с некоторым значением $\mathcal{J}_{\text{ост}}$. Это значение намагниченности магнетика $\mathcal{J}_{\text{ост}}$ называется остаточной намагниченностью. Чтобы довести \mathcal{J} до 0, т.е. размагнитить магнетик, надо увеличить внешнее поле, изменив направление на противоположное.

Напряженность магнитного поля, при которой намагниченность магнетика станет равной нулю, называется коэрцитивной силой (H_k). Проводя полный цикл изменения поля в обе стороны, получим так называемую петлю гистерезиса (запаздывания) намагниченности (рисунок 7.4). Причин такого запаздывания много. Одна из них связана с несовершенствами кристаллической структуры магнетика.

В зависимости от вида петли гистерезиса все ферромагнитные вещества можно условно разбить на две группы: мягкие магнитные материалы и жесткие магнитные материалы. К магнитомягким материалам относят материалы, имеющие малую остаточную намагниченность $\mathcal{J}_{\text{ост}}$ (остаточную индукцию $B_{\text{ост}}$) и малую коэрцитивную силу H_k , узкую петлю гистерезиса (рисунок 7.5, а). Материалы, имеющие большие значения $\mathcal{J}_{\text{ост}}$ (или $B_{\text{ост}}$) и H_k , с широкой петлей гистерезиса, относят к магнитожестким или магнитотвердым магнитным материалам (рисунок 7.5, б). Магнитомягкие материалы находят свое применение во всех тех случаях, когда требуется небольшая коэрцитивная сила, малые потери на перемагничивание. Они используются, главным образом, в качестве магнитопроводов для трансформаторов, электрических машин, сердечников электромагнитов и т.п. Магнитожесткие материалы используются в технике в качестве постоянных магнитов.

На основе ферримангнетиков (например, магний-марганцевого феррита) изготавливаются материалы, обладающие так называемой прямоугольной петлей гистерезиса (рисунок 7.5, в). Такие материалы используются для магнитной памяти электронно-вычислительных машин.

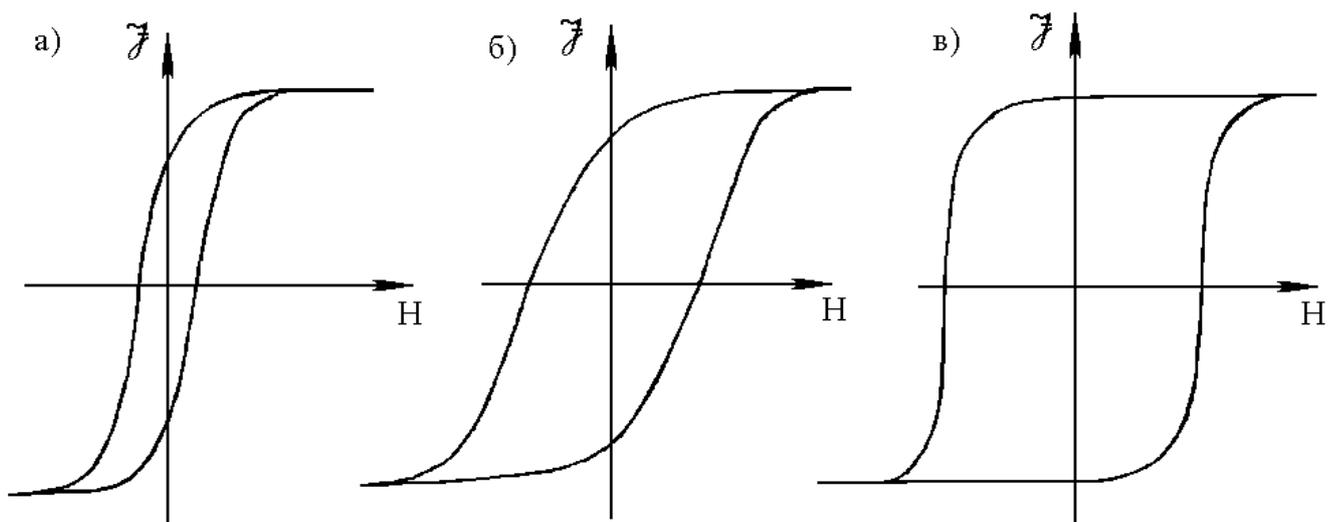


Рисунок 7.5 – Петли гистерезиса магнитомягкого, магнитожесткого и с прямоугольной петлей магнитных материалов

Магнитная восприимчивость и магнитная проницаемость ферромагнетика не являются постоянными величинами, а зависят от H . Графики зависимости магнитной проницаемости и магнитной восприимчивости ферромагнетиков приведены на рисунке 7.6, а, б.

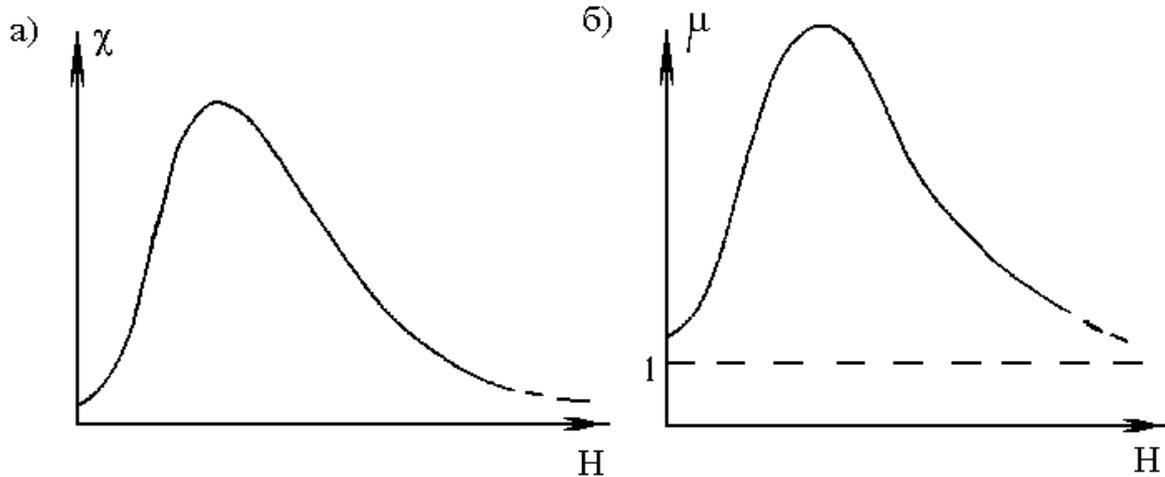


Рисунок 7.6 – Графики зависимости магнитной восприимчивости (а) и магнитной проницаемости (б) ферромагнетиков от напряженности магнитного поля

При перемагничивании образца часть энергии магнитного поля затрачивается на перестройку доменов. Элементарная работа, произведенная при перестройке доменов в единице объема сердечника тороида, dA равна:

$$dA = H \cdot dB.$$

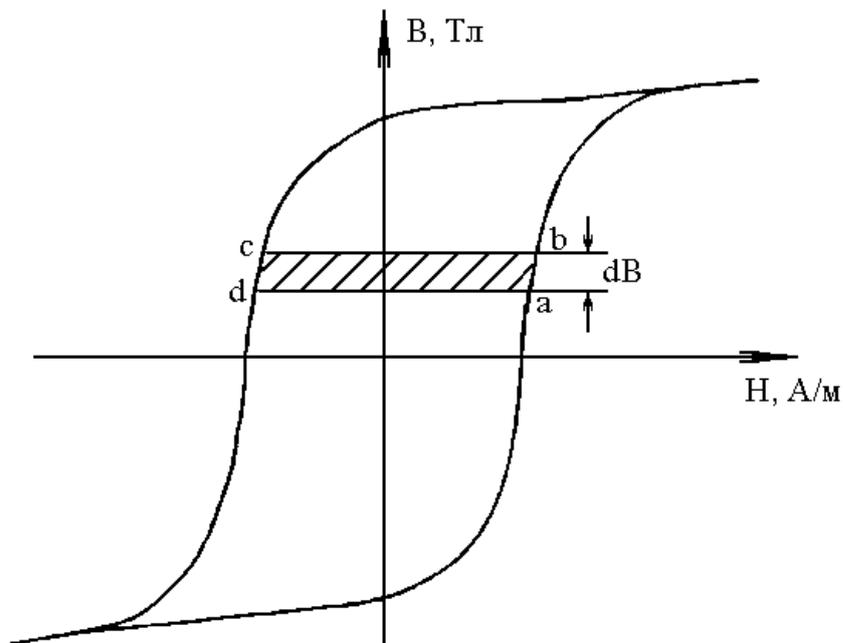


Рис. 7.7 – Цикл перемагничивания ферромагнетика

Из рисунка 7.7, где приведена зависимость $B = f(H)$, видно, что произведение $H \cdot dB$ для участков петли гистерезиса ab и cd выражает площадь плоскости $abcd$.

Полный цикл перемагничивания может быть представлен как сумма таких участков, следовательно, полная работа перемагничивания единицы объема сердечника тороида пропорциональна сумме площадей полосок, аналогичных $abcd$, т. е. будет равна:

$$A = \oint H \cdot dB.$$

7.4 Теория метода и описание установки

Если поместить ферромагнетик в магнитное поле, создаваемое переменным током, то петлю гистерезиса можно наблюдать на экране осциллографа, подав на горизонтально отклоняющие пластины трубки (вход X) напряжение U_x , пропорциональное H , а на вертикально отклоняющие (вход Y) напряжение U_y , пропорциональное B (рисунок 7.8).

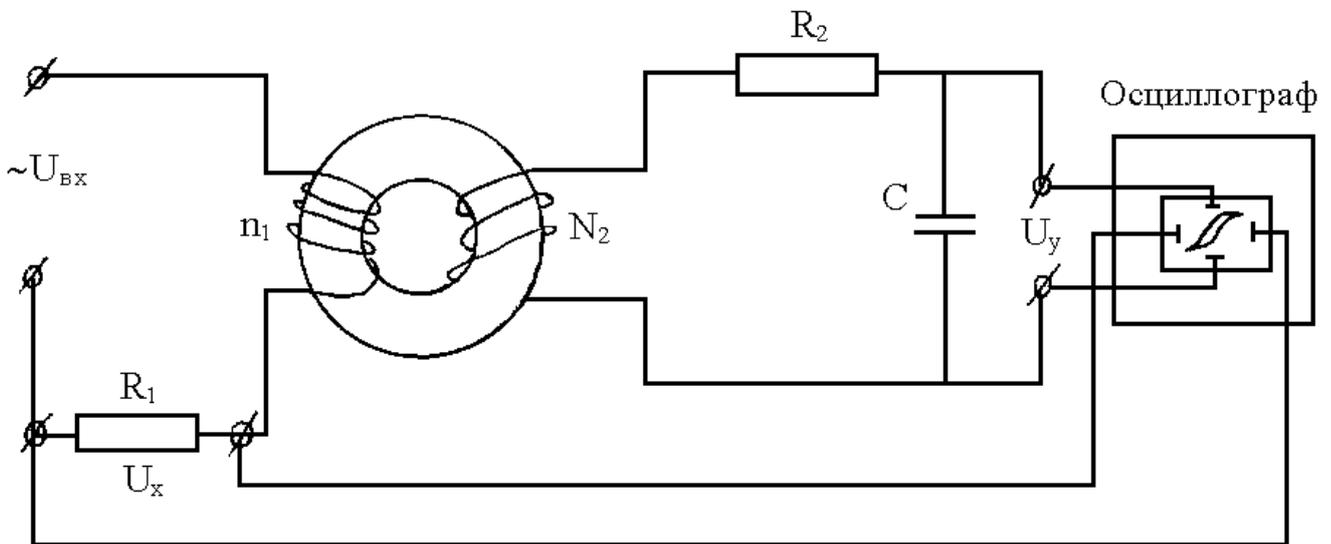


Рисунок 7.8 – Схема установки для снятия кривой намагничивания

Напряженность поля внутри тороида равна: $H = n_1 \cdot I_1$, где I_1 – ток через первичную обмотку, n_1 – число витков на 1 метре первичной обмотки. Напряжение, подаваемое на горизонтально отклоняющие пластины:

$$U_x = I_1 R_1 = \frac{R_1 H}{n_1}. \quad (84)$$

Заметим, что U_x пропорционально H .

Во вторичной обмотке тороида источником тока I_2 является ЭДС индукции $\varepsilon_2 = -\frac{d\Phi}{dt} \cdot N_2$, где $\Phi = B \cdot S$ – поток вектора магнитной индукции через поверхность S , охватываемую одним витком, а N_2 – число витков во вторичной обмотке. Так как площадь витка постоянна, то ЭДС во вторичной цепи можно выразить:

$$\varepsilon_2 = -S \cdot N_2 \frac{dB}{dt} \quad (85)$$

или в соответствии со вторым правилом Кирхгофа:

$$\varepsilon_2 = I_2(R_2 + X_C) = I_2R_2 + U_C, \quad (86)$$

где X_C – сопротивление конденсатора переменному току. На вход Y осциллографа подается напряжение с конденсатора, равное:

$$U_C = U_Y = \frac{q}{C} = \int \frac{I_2 dt}{C}. \quad (87)$$

Если R_2 велико (10^5 Ом), а $C = 0,5 \div 1,0 \text{ мкф}$, то $X_C \ll R_2$.

Тогда

$$\varepsilon_2 = I_2R_2 = -SN_2 \frac{dB}{dt}.$$

Откуда

$$I_2 = \frac{\varepsilon_2}{R_2} = -\frac{1}{R_2} SN_2 \frac{dB}{dt}.$$

Подставляя I_2 в (87), получим напряжение, подаваемое на вертикально отклоняющие пластины:

$$U_Y = -\frac{N_2 S}{R_2 C} \int \frac{dB}{dt} dt = -\frac{N_2 S}{R_2 C} B, \quad (88)$$

т.е. U_Y пропорционально B . Таким образом, на одни пластины подается напряжение, пропорциональное B , на другие – пропорциональное H . На экране получится петля гистерезиса.

За один период синусоидального изменения тока луч опишет на экране петлю гистерезиса, за каждый следующий период повторит её.

Увеличивая с помощью ЛАТРа напряжение U_X , будем увеличивать амплитуду колебаний напряженности H и получать на экране ряд различных по площади петель. Верхняя точка петли находится на кривой намагничивания. Следовательно, необходимо снять с осциллограмм координаты X и Y вершин петель гистерезиса. Для построения кривой намагничивания вычисляют H и B .

Выразим из (84) H :

$$H = \frac{n_1}{R_1} U_X. \quad (89)$$

Из (88) B :

$$B = \frac{R_2 C}{N_2 S} U_Y.$$

U_X и U_Y можно определить, зная величины напряжений, вызывающих отклонение луча на одно деление в направлении осей X и Y при данном усилении:

$$\begin{aligned} U_x &= x \cdot j_x, \\ U_y &= y \cdot j_y, \end{aligned} \quad (90)$$

где X и Y координаты вершин петли гистерезиса.

Подставляя U_x и U_y в выражение (90), получаем:

$$H = \frac{n_1}{R_1} \cdot j_x \cdot x = K_x \cdot x; \quad (91)$$

$$B = \frac{R_2 C}{N_2 S} \cdot j_y \cdot y = K_y \cdot y, \quad (92)$$

где

$$K_x = \frac{n_1}{R_1} \cdot j_x; \quad K_y = \frac{R_2 C}{N_2 S} \cdot j_y. \quad (93)$$

При вычислении H и B по формулам (91 ÷ 93) X и Y следует измерять в делениях, j_x и j_y – в В/дел. Тогда H и B будут иметь размерности А/м и Тл соответственно, так как K_x – цена деления по оси X сетки осциллографа в единицах напряженности магнитного поля $\left(\frac{\text{А/м}}{\text{дел}}\right)$, K_y – цена деления по оси Y в единицах индукции магнитного $\left(\frac{\text{Тл}}{\text{дел}}\right)$.

7.5 Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

- 1) Собрать схему установки, изображенную на рисунке 7.8.
- 2) Включить осциллограф и вывести электронный луч в центр координатной сетки на экране.
- 3) После проверки схемы преподавателем или лаборантом подать на её вход переменное регулируемое напряжение. Ручками “Усиление X ” и “Усиление Y ” добиться того, чтобы петля гистерезиса занимала большую часть экрана.
- 4) Зарисовать петлю вместе с координатной сеткой*).
- 5) Определить координаты вершин петли X и Y и $(-X, -Y)$. Уменьшая подаваемое переменное напряжение, на экране осциллографа можно получить семейство петель гистерезиса. Снять и записать координаты 8 ÷ 10 положений вершин. Измерения проводить до тех пор, пока кривая не стянется в точку.
- 6) Разобрать схему, отсоединить панель установки.
- 7) Не меняя “Усиление X ” и “Усиление Y ”, определить цены деления осциллографа j_x и j_y . Для этого поочередно на вход X и вход Y осциллографа

*). В современных осциллографах типа С1-68 усиление Y регулируется ступенчато и плавно, регулировка усиления по оси X отсутствует. В этом случае чувствительность осциллографа по входам Y и X известна, пункт 7 можно не выполнять. При необходимости значения чувствительности можно проверить, воспользовавшись встроенным калибратором.

(рисунок 7.9) подавать переменное напряжение (не более 6 В), подобрать его величину такой, чтобы длина линий L_x или L_y была наибольшей, но не выходила за пределы экрана, измерить U_x и U_y с помощью вольтметра. Определить L_x и L_y в делениях.

Поскольку амплитудному значению напряжения соответствует половина длины световой линии на экране, то:

$$j = \frac{2U_a}{L} = \frac{2\sqrt{2} \cdot U_{\text{эф.}}}{L}, \quad (94)$$

где $U_{\text{эф.}}$ – эффективное значение напряжения, измеряемое вольтметром переменного тока.

Используя выражение (94), рассчитать j_x и j_y .

8) Вычислить K_x и K_y по формуле (93).

9) Вычислить значения $H = x \cdot K_x$ и $B = y \cdot K_y$ для координат всех полученных вершин петель гистерезиса.

10) Построить график зависимости $B = f(H)$, откладывая по оси абсцисс H в А/м, по оси ординат – B в Тл.

11) Вычертить на миллиметровке петлю гистерезиса, выбрав по осям X и Y тот же масштаб, что и на координатной сетке.

12) Подсчитать число клеток N , охватываемых петлей.

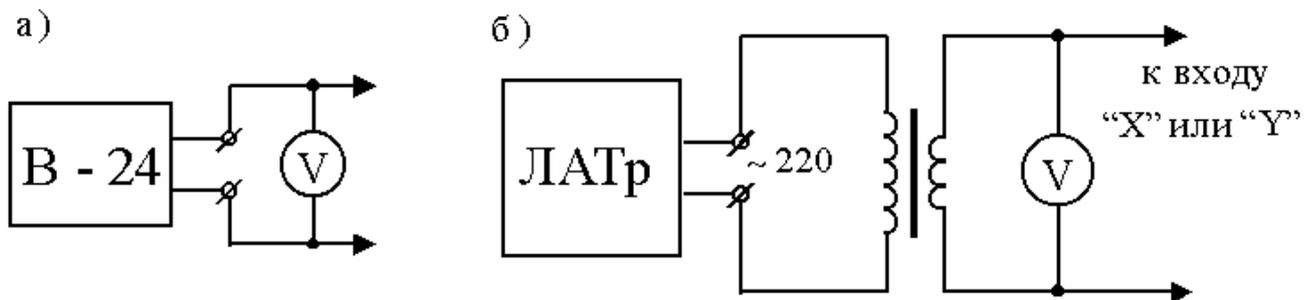


Рисунок 7.9 – Блок-схема установки для определения чувствительности осциллографа с использованием источника питания В-24 (а) или ЛАТРа (б)

13) Рассчитать тепловые потери на перемагничивание единицы объема тороидального сердечника:

$$Q = K_x \cdot K_y \cdot N, \quad (95)$$

где N – число клеток охватываемых петлей;

$K_x \cdot K_y$ – произведение, определяющее площадь одной клетки. Работа, произведенная при перемагничивании единицы объема образца за 1 секунду, определяется как:

$$\frac{A}{t} = K_x \cdot K_y \cdot N \cdot v,$$

где $v = 50$ Гц – частота переменного напряжения.

Тепловые потери на перемагничивание определяются теплотой, выделенной в единице объема тороида за секунду, т.е.

$$\frac{Q}{t} = K_x \cdot K_y \cdot N \cdot v. \quad (96)$$

14) Оформить отчет, который должен содержать:

- Таблицу наблюдений и расчетов (таблица 7.1).
- Примеры расчетов j_x , j_y , K_x , K_y , H , B , Q .
- Графики $B = f(H)$ и петли гистерезиса, по которой рассчитана мощность потерь на перемагничивание.

Таблица 7.1

Измеряемые величины	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X, дел.										
Y, дел.										
H, А/м										
B, Тл										

7.6 Техника безопасности

- 1) В работе используется опасное напряжение 220 В.
- 2) Включать установку можно только с разрешения преподавателя.
- 3) Перед включением блока питания выходной потенциометр необходимо перевести в крайнее левое положение.
- 4) Все переключения в схеме выполняются только при отключенном блоке питания.
- 5) После выполнения работы отключите напряжение и разберите схему.

7.7 Контрольные вопросы

- 1) Что характеризуют B и H ?
- 2) Процесс намагничивания ферромагнетика.
- 3) Как по кривой намагничивания построить зависимости $\mu = f(H)$?
- 4) Чему равна объемная плотность энергии магнитного поля?
- 5) Какова роль вторичной обмотки тороида?
- 6) Доказать, что $X_C \ll R_2$.
- 7) Каков физический смысл K_x и K_y ?

8 Лабораторная работа

«Определение точки Кюри с помощью осциллографа»

8.1 Цель работы

Определение точки Кюри ферромагнетика.

8.2 Принцип работы установки

Схема экспериментальной установки для измерения точки Кюри приведена на рисунке 8.1. Установка состоит из электрической печи 1, спирали 3, которая намотана в виде соленооида (первичная катушка) и рассчитана на напряжение сети 220 В, сердечника 2 из исследуемого ферромагнитного материала, вторичной катушки 4, намотанной на сердечник, и схемы интегрирования R_2, C .

Принцип работы установки аналогичен изложенному в разделе 7 (рисунок 7.8). Отличие заключается лишь в том, что при включении первичной катушки в сеть с помощью ключа S температура в печи плавно увеличивается и регистрируется с помощью термометра 5 или термопары.

Как следует из выражения (88), $U_y \sim B$, вместе с тем $B = \mu \cdot \mu_0 \cdot H$, в результате имеем $U_y \sim \mu \cdot H$. При изменении температуры в печи H практически не изменяется, об этом можно судить по амплитуде горизонтального отклонения луча осциллографа. Поэтому изменение U_y (или B) с повышением температуры будет связано главным образом с изменением μ – магнитной проницаемости сердечника.

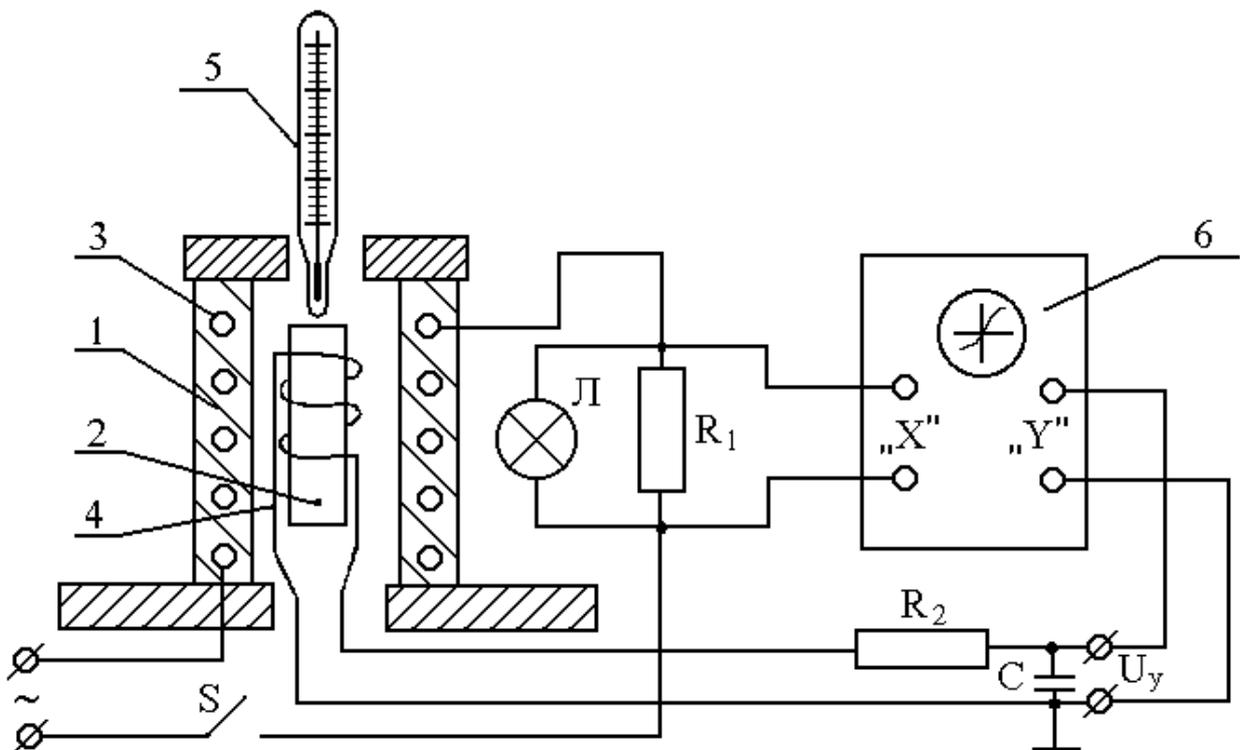


Рисунок 8.1 – Схема установки для определения точки Кюри:

1 – печь; 2 – ферромагнитный сердечник; 3 – нагреватель-спираль (первичная катушка); 4-вторичная катушка; 5 – термометр; 6 – осциллограф; S – выключатель нагрева; Л – сигнальная лампа

8.3 Порядок выполнения работы

1) При подготовке к работе изучить разделы 7.1 - 7.3 работы “Снятие кривой намагничивания и петли гистерезиса с помощью осциллографа”.

2) Подключить осциллограф к макету установки, схема которой приведена на рисунке 8.1.

3) Включить осциллограф и вывести электронный луч в центр координатной сетки на экране.

4) Включить нагрев печи. Потенциометром “Усиление X” осциллографа установить полное отклонение луча по горизонтали 40 мм.

5) Через каждые 5 °С фиксировать значение амплитуды отклонения луча по оси Y. Результаты заносить в таблицу 8.1.

6) Когда амплитуда отклонения луча начнет уменьшаться, показания снимать через 2 - 3 °С.

Таблица 8.1

T, °C					
y, мм					
y/y _{max}					

1) По полученным данным построить график зависимости $y = f(T)$. По оси абсцисс откладывается температура от комнатной до 100 °C.

2) Определить точку Кюри как точку пересечения касательной к наиболее крутому участку полученной кривой и оси абсцисс.

8.4 Техника безопасности

- 1) В работе используется опасное напряжение 220 В.
- 2) Включать установку можно только с разрешения преподавателя.
- 3) Перед включением блока питания выходной потенциометр необходимо перевести в крайнее левое положение.
- 4) Все переключения в схеме выполняются только при отключенном блоке питания.
- 5) После выполнения работы отключите напряжение и разберите схему.

8.5 Контрольные вопросы

- 1) Диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики, их качественные характеристики и основные отличия.
- 2) Как изменяется магнитная восприимчивость магнетиков с увеличением напряженности внешнего магнитного поля?
- 3) Физический смысл точки Кюри для ферромагнетиков, какие магнитные характеристики изменяются при её достижении?
- 4) Кривая намагничивания ферромагнетиков и её качественное объяснение.
- 5) Принцип работы установки. Почему отклонение луча по вертикали пропорционально B , а по горизонтали – H ?

9 Лабораторная работа «Определение точки Кюри с помощью индуктивно-омического делителя»

9.1 Цель работы

Определение точки Кюри ферромагнетика.

9.2 Принцип действия установки

В основу работы установки положен способ измерения индуктивности цепи на переменном токе, известный под названием индуктивно-омического делителя. Суть метода состоит в том, что исследуемая катушка индуктивности включается в цепь последовательно с резистором (рисунок 9.1). При этом индуктивное

сопротивление катушки переменному току $x_L = \omega L$ должно быть гораздо меньше последовательно соединенного сопротивления резистора, тогда ток в цепи в основном определяется сопротивлением резистора:

$$I = \frac{\varepsilon}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \approx \frac{\varepsilon}{R}. \quad (97)$$

Падение напряжения на катушке индуктивности будет определяться как:

$$U_L = I \cdot \omega L = \frac{\varepsilon}{R} \omega L. \quad (98)$$

Таким образом, при $\varepsilon = \text{const}$ и $\omega = \text{const}$ показания вольтметра будут прямо пропорциональны индуктивности цепи.

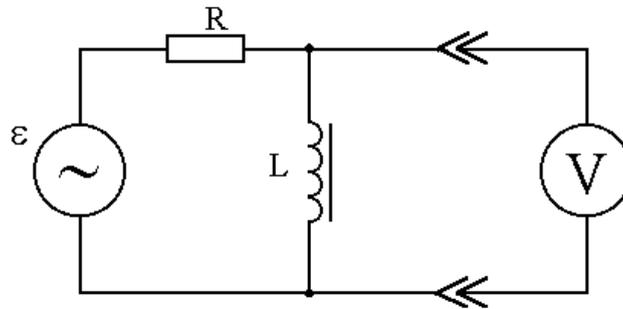


Рисунок 9.1 – Метод индуктивно-омического делителя.
Схема принципиальная

Рассмотрим в качестве примера катушку индуктивности с тороидальным сердечником, для которой

$$L = \frac{\mu \mu_0 N^2 S}{\ell}, \quad (99)$$

где μ – магнитная проницаемость сердечника;

N , S , ℓ – число витков, площадь и длина средней линии сердечника.

Если включить её в цепь и нагревать, то изменение индуктивности при повышении температуры будет, главным образом, связано с изменением магнитной проницаемости сердечника, что непосредственно отразится на показаниях вольтметра:

$$U_L = \frac{\varepsilon}{R} \cdot \omega \cdot \frac{\mu_0 N^2 S}{\ell} \cdot \mu \quad (100)$$

Изменением геометрических размеров сердечника при нагревании в этом случае можно пренебречь, так как оно гораздо меньше изменения магнитной проницаемости.

В предлагаемой лабораторной работе в качестве сердечника катушки индуктивности используется образец марганец-цинкового феррита в виде тороида. Нагрев образца осуществляется с помощью электрической печи сопротивления. Контроль температуры образца осуществляется с помощью кремниевого диодного

датчика и стрелочного электроизмерительного прибора. Источником ЭДС переменного тока является генератор звуковой частоты, для измерения падения напряжения на индуктивности используется милливольтметр переменного тока.

9.3 Порядок выполнения работы

1) При подготовке к работе изучить разделы 7.1 - 7,3 работы “Снятие кривой намагничивания и петли гистерезиса с помощью осциллографа.

2) Подключить электроизмерительные приборы к макету установки в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 9.1.

3) Установить напряжение выхода звукового генератора в пределах от 1 до 5 В, подобрать предел измерения милливольтметра переменного тока таким образом, чтобы отклонение стрелки не превышало 20 % от конечного значения шкалы при комнатной температуре образца.

4) Включить нагрев печи и через каждые 5 °С снимать показания вольтметра и заносить в таблицу 9.1. Когда показания вольтметра станут заметно уменьшаться, значения U_L записывать через каждые 2...3 °С. При нагреве образца до $T \approx 90$ °С выключить нагреватель. Провести аналогичные измерения при охлаждении образца.

Таблица 9.1

$T, ^\circ\text{C}$									
$U_L, \text{мВ}$									
U_L/U_0									

5) Если обозначить магнитную проницаемость сердечника и показание вольтметра при комнатной температуре через $\mu_{\text{нач}}$ и U_0 соответственно, то, учитывая соотношение (100), получим:

$$\frac{U_L}{U_0} = \frac{\mu}{\mu_{\text{нач}}}. \quad (101)$$

Таким образом, предлагаемая операция нормировки позволяет устранить влияние таких параметров, как чувствительность вольтметра и ЭДС генератора, сопротивление делителя R и геометрические размеры катушки индуктивности.

По полученным данным построить график зависимости $\mu/\mu_{\text{нач}} = f(T)$. По оси абсцисс необходимо откладывать температуру от комнатной до 100 °С.

6) Пользуясь графиком, определить температуру Кюри для материала сердечника, использованного в данной работе.

9.4 Техника безопасности

1) В работах используется опасное напряжение 220 В.

2) Запрещается включать схемы установок без проверки и разрешения преподавателя.

- 3) Все изменения в схеме производить только при выключенном питании.
- 4) После выполнения работы отключить сетевое напряжение, разобрать схему, привести в порядок рабочее место.

9.5 Контрольные вопросы

- 1) Диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики, их качественные характеристики и основные отличия.
- 2) Как изменяется магнитная восприимчивость магнетиков с увеличением напряженности внешнего магнитного поля?
- 3) Физический смысл точки Кюри для ферромагнетиков, какие магнитные характеристики изменяются при её достижении?
- 4) Кривая намагничивания ферромагнетиков и её качественное объяснение.
- 5) Принцип работы установки. Почему отклонение луча по вертикали пропорционально B , а по горизонтали – H ?

10 Лабораторная работа

«Индуктивность и емкость в цепи переменного тока»

10.1 Цель работы

Изучение явления резонанса и определение индуктивности катушек и емкости конденсаторов.

10.2 Основные понятия и закономерности

Если контур, содержащий омическое сопротивление R , индуктивность L , и емкость C , подсоединить к источнику с переменной ЭДС (рисунок 10.1) ε :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t, \quad (102)$$

то в нем возникнет переменный ток. Кроме внешней ЭДС в контуре будет действовать ЭДС самоиндукции (ε_c так как сила тока I в контуре изменяется со временем:

$$\varepsilon_c = -L \frac{dI}{dt}. \quad (103)$$

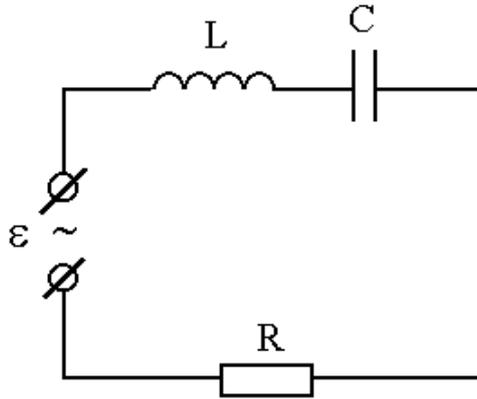


Рисунок 10.1 – Электрическая схема соединения элементов цепи переменного тока

Полная ЭДС, действующая в контуре, окажется равной:

$$\varepsilon = -L \frac{dI}{dt} \quad (104)$$

В каждый данный момент она должна быть равна сумме падений потенциалов вдоль цепи. В данном случае это разность потенциалов на обкладках конденсатора U_C и падение напряжения на активном сопротивлении R :

$$I \cdot R + U_C = \varepsilon - L \frac{dI}{dt}$$

или

$$L \frac{dI}{dt} + I \cdot R + U_C = \varepsilon_0 \sin \omega t. \quad (105)$$

Так как разность потенциалов на конденсаторе U_C связана с емкостью конденсатора C и зарядом q соотношением $q = C \cdot U_C$, а сила тока $I = \frac{dq}{dt}$, то

$$I = C \frac{dU_C}{dt} \quad \text{или} \quad \frac{dU_C}{dt} = I \cdot \frac{1}{C}. \quad (106)$$

Продифференцировав равенство (105) по времени, имеем:

$$L \frac{d^2 I}{dt^2} + R \frac{dI}{dt} + \frac{dU_C}{dt} = \varepsilon_0 \cdot \omega \cdot \cos \omega t.$$

Подставив вместо $\frac{dU_C}{dt}$ соотношение (106), получим дифференциальное уравнение, которому должна удовлетворять сила тока в цепи с последовательно соединенными емкостью, индуктивностью и сопротивлением:

$$L \frac{d^2 I}{dt^2} + R \frac{dI}{dt} + \frac{1}{C} \cdot I = \varepsilon_0 \omega \cdot \cos \omega t. \quad (107)$$

Решением этого уравнения является выражение:

$$I = I_0 \sin(\omega t - \varphi), \quad (108)$$

где I_0 – амплитудное значение тока, равное:

$$I_0 = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{R^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}}, \quad (109)$$

φ – сдвиг фаз между ЭДС и силой тока, который находится из соотношения:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}}{R}. \quad (110)$$

Величина $Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}$ – полное сопротивление цепи (импеданс), $\left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}\right)$ – реактивное сопротивление цепи. Вывод формул для I_0 и $\operatorname{tg} \varphi$ см. в приложении.

Амплитудное значение тока, как это видно из соотношения (109), зависит от ε_0 , ω , R , L , и C , а сдвиг фаз – от ω , R , L , и C .

В цепи, содержащей только индуктивность ($R = 0$), сдвиг фаз между током и ЭДС, как это видно из соотношения (101), равен $+\frac{\pi}{2}$ ($\operatorname{tg} \varphi = +\infty$), т. е. ток отстает по фазе от ЭДС на $\frac{\pi}{2}$, а значит и от напряжения на индуктивности.

В цепи, содержащей только емкость ($R = 0$ и $L = 0$), сдвиг фаз равен $-\frac{\pi}{2}$ ($\operatorname{tg} \varphi = -\infty$), т. е. ток опережает по фазе напряжение на емкости на $\frac{\pi}{2}$.

При включении в цепь индуктивности и емкости напряжение на индуктивности U_{oL} опережает по фазе напряжение на конденсаторе U_{oC} на π т.е. их фазы противоположны.

В цепи, содержащей индуктивность, емкость и сопротивление, сдвиг по фазе тока и ЭДС можно найти, пользуясь векторной диаграммой напряжений, приведенной на рисунке 10.2.

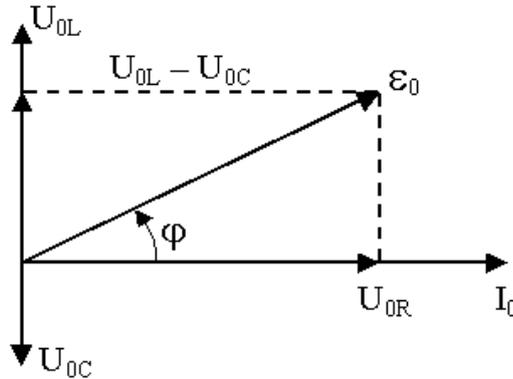


Рисунок 10.2 – Векторная диаграмма напряжений

Полное сопротивление цепи Z имеет минимальное значение при условии:

$$\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} = 0. \quad (111)$$

Амплитудное значение тока при этом будет иметь максимальное значение, равное:

$$I_0 = \frac{\varepsilon_0}{R}. \quad (112)$$

Наступает резонанс. Частота $\omega_{\text{рез}}$, при которой наступает резонанс, определяется из условия (111) и равна:

$$\omega_{\text{рез}} = \sqrt{\frac{1}{L \cdot C}}. \quad (113)$$

При резонансе сдвиг фаз между током и ЭДС равен 0, а напряжения на индуктивности и емкости равны по величине, и в сумме равны 0, так как они противоположны по фазе. При этом амплитудные напряжения на емкостном и индуктивном сопротивлениях достигают максимальной величины и могут значительно превышать амплитудное значение ЭДС ε_0 , если емкостное и индуктивное сопротивления значительно превышают омическое сопротивление цепи. Это явление получило название резонанса напряжения. На рисунке 10.3 приведена векторная диаграмма напряжений для данного случая.

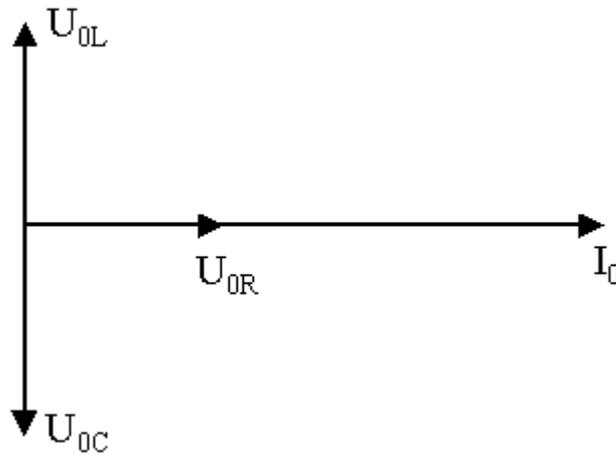


Рисунок 10.3 – Векторная диаграмма напряжений при резонансе

Явление резонанса можно изучить, если изменять одну из величин ω , L или C , оставляя неизменными две другие. Зависимость тока I_0 от круговой частоты ω при данном омическом сопротивлении R и изменяющемся реактивном сопротивлении $\left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}\right)$ графически представляется так называемой резонансной кривой: $I = f(\omega)$ (рисунок 10.4).

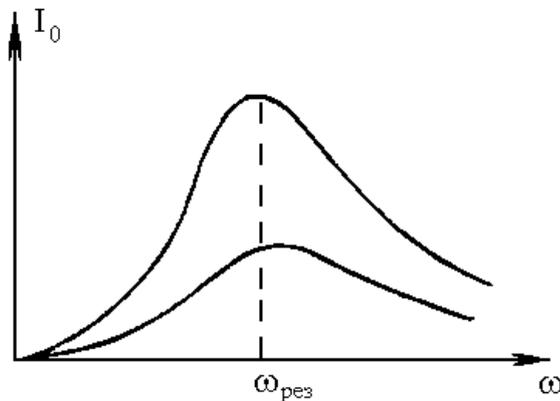


Рисунок 10.4 – Резонансная кривая

Кривая имеет максимум при условии $\omega \cdot L = \frac{1}{\omega \cdot C}$. Максимум резонансной кривой

при заданном амплитудном значении ЭДС ε_0 зависит от омического сопротивления цепи R : чем меньше R , тем резче выявляются резонансные свойства цепи.

Но явление резонанса изучается также путем исследования зависимости тока от емкости или индуктивности, т.е. $I = f(C)$ или $I = f(L)$ при постоянной круговой частоте ω .

10.3 Измерение индуктивности соленоида Методика измерения и схема установки

Для измерения индуктивности используем цепь переменного тока, содержащую последовательно соединенные индуктивность L и омическое сопротивление R (рисунок 10.5).

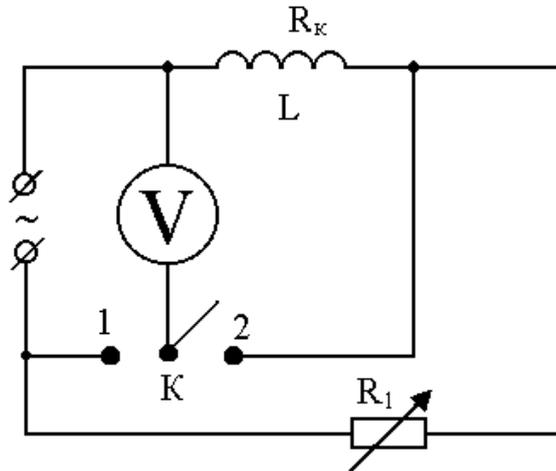


Рисунок 10.5 – Электрическая схема для измерения индуктивности

В качестве источника переменного тока используется выпрямитель ВС-24 или какой-либо другой источник, позволяющий получить переменное напряжение не менее 30 В, а сопротивления R_1 – магазин сопротивлений на 111 111 Ом.

Если индуктивность L и сопротивление R подобраны так, что $R_1 \gg \omega L$, то амплитудное значение тока I_0 будет определяться практически только активным сопротивлением цепи R_1 , т.е.

$$I_0 = \frac{\varepsilon_0}{R_1}. \quad (114)$$

Амплитудное значение напряжения на катушке индуктивности U_{0L} равно:

$$U_{0L} = I_0 \sqrt{(\omega \cdot L)^2 + R_K^2},$$

откуда

$$L = \frac{\sqrt{U_{0L}^2 - R_K^2 I_0^2}}{\omega \cdot I_0}. \quad (115)$$

Подставив I_0 в полученное выражение для L , найдем:

$$L = \frac{\sqrt{U_{0L}^2 R_1^2 - R_K^2 \varepsilon_0^2}}{\omega \cdot \varepsilon_0}. \quad (116)$$

Если активное сопротивление катушки $R_K \ll \omega L$, то

$$L = \frac{U_{0L} \cdot R_1}{\omega \cdot \varepsilon_0}. \quad (117)$$

Но так как амплитудное значение напряжения U_{0L} связано с его эффективным значением соотношением $U_{L\text{эф}} = \frac{U_{0L}}{\sqrt{2}}$, то для индуктивности получим выражение:

$$L = \frac{U_{L\text{эф}} \cdot R_1}{\omega \cdot \varepsilon_{\text{эф}}}. \quad (118)$$

Таким образом, измерив напряжение на клеммах источника $\varepsilon_{\text{эф}}$ и на катушке индуктивности $U_{L\text{эф}}$, можно определить индуктивность катушки L .

Порядок выполнения работы

- 1) Собрать схему в соответствии с рисунком 10.5, включив в цепь катушку, содержащую 2400 витков.
- 2) На магазине сопротивлений R_1 установить сопротивление 100 кОм.
- 3) Включить источник питания и подать напряжение 10 ÷ 20 В.
- 4) Измерить напряжение на клеммах источника $\varepsilon_{\text{эф}}$, замкнув ключ K в положение 1.
- 5) Измерить напряжение на катушке $U_{L\text{эф}}$, замкнув ключ K в положение 2.
- 6) Определить индуктивность катушки L по формуле (118).
- 7) Те же измерения произвести при сопротивлении магазина 50 кОм и 5 кОм и определить индуктивность катушки при этих значениях сопротивления.
- 8) Сравнить полученные значения индуктивности.
- 9) Измерить омическое сопротивление катушки омметром и оценить погрешность в определении индуктивности.
- 10) Измерить индуктивность катушки, имеющей 1200 витков.

10.4 Измерение емкости конденсатора

Методика измерения и схема установки

Для измерения емкости конденсатора C используется схема, приведенная на рисунке 10.6.

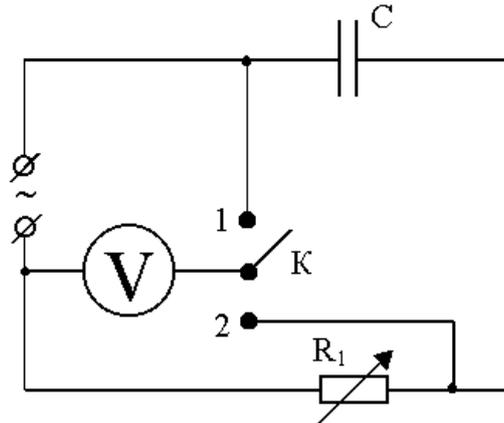


Рисунок 10.6 – Электрическая схема для измерения емкости конденсатора

Как и при измерении индуктивности в качестве R_1 используется магазин сопротивлений, а источника переменного тока – выпрямитель ВС-24. Если емкость и сопротивление R_1 подобраны так, что $\frac{1}{\omega \cdot C} \gg R_1$, то ток в цепи будет определяться только реактивным сопротивлением $R_c = \frac{1}{\omega \cdot C}$, т.е.

$$I_0 = \frac{\varepsilon_0}{R_c} = \omega \cdot C \cdot \varepsilon_0 \quad (119)$$

Тогда падение напряжения на активном сопротивлении R_1 будет равно:

$$U_{0R} = I_0 R_1 = \omega \cdot C \cdot \varepsilon_0 \cdot R_1.$$

Откуда

$$C = \frac{U_{0R}}{\omega \cdot R_1 \cdot \varepsilon_0} = \frac{U_{R \text{ эф}}}{\omega \cdot R_1 \cdot \varepsilon_{\text{эф}}}. \quad (120)$$

Следовательно, для определения емкости достаточно измерить напряжение на клеммах источника и магазине сопротивлений.

Порядок выполнения работы

- 1) Собрать схему в соответствии с рисунком 10.6.
- 2) На магазине сопротивлений установить сопротивление 100 Ом.
- 3) Включить источник питания и подать напряжение 10 ÷ 20 В.
- 4) Измерить напряжение на клеммах источника (ключ К в положении 1).
- 5) Измерить напряжение на магазине сопротивлений (ключ К в положении 2).
- 6) По формуле (120) определить емкость конденсатора.

10.5 Изучение явления резонанса

Методика исследования и схема установки

Для исследования явления резонанса используется схема, представленная на рисунке 10.7, где L – катушка индуктивности, C – батарея конденсаторов

переменной емкости, R_1 – магазин сопротивлений, V – вольтметр переменного тока, A – миллиамперметр переменного тока.

При изменении емкости изменяется величина полного сопротивления, и, следовательно, и сила тока.

В работе предлагается исследовать зависимость тока в цепи от емкости при частоте изменения тока 50 Гц, т.е. $I = f(C)$.

Порядок выполнения работы

- 1) Собрать схему в соответствии с рисунком 10.7. Катушку индуктивности включить на 2400 витков.
- 2) Установить на батарее конденсаторов наименьшую емкость.
- 3) Установить напряжение источника 30 В (ЭДС источника).

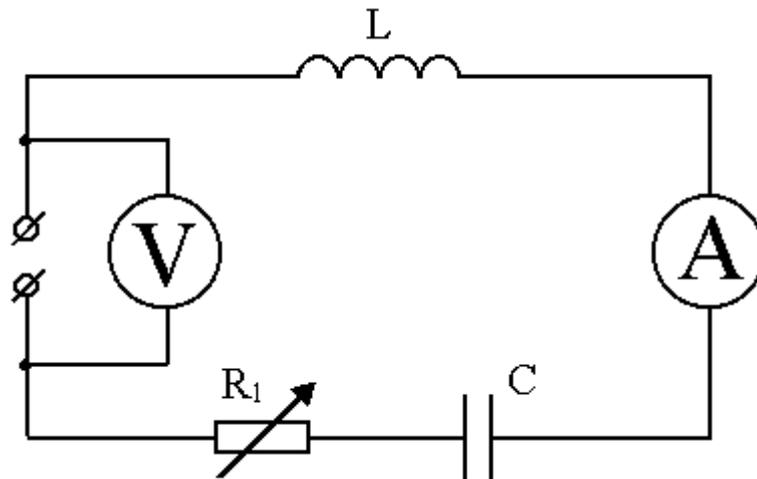


Рисунок 10.7 – Электрическая схема для изучения явления резонанса

- 4) Измерить силу тока в цепи при значениях емкости 0,3 мкФ, 1 мкФ, 2 мкФ, 4 мкФ, 8 мкФ, 16 мкФ, 32 мкФ, 58 мкФ.
- 5) Измерить напряжение на катушке индуктивности U_{LR} при наибольшем значении тока. Сравнить его со значением напряжения источника.
- 6) Вычислить напряжение U_L катушки, используя ток и активное сопротивление катушки.
- 7) Измерить напряжение на конденсаторе и сравнить его с U_L .
- 8) Построить график зависимости тока от емкости $I = f(C)$.

10.6 Техника безопасности

- 1) Включение источника производится только после проверки схемы преподавателем или лаборантом.
- 2) Во время работы запрещается касаться токоведущих частей схемы.
- 3) По окончании работы уменьшить напряжение на источнике до нуля, после чего отключить от сети.

10.7 Контрольные вопросы

- 1) Как записать закон Ома для переменного тока?
- 2) От каких величин зависит индуктивное, емкостное и полное сопротивление цепи переменного тока?
- 3) От чего зависит сдвиг фаз между током и напряжением? Как он определяется?
- 4) Как экспериментально измерить индуктивность и емкость?
- 5) Что такое резонанс напряжений? При каких условиях наблюдается?

Список использованных источников

- 1 Детлаф А. А., Яворский Б.М. Курс физики. – М.: Высш. шк., 1989.
- 2 Савельев И. В. Курс общей физики: В 3т.– Т.2. – М.: Наука, 1978.
- 3 Калашников М. И. Электричество.– М.: Наука, 1977.
- 4 Качарников М.И., Цукерник В.М. Природа магнетизма. – М.: Наука, 1982.

Приложение А (справочное)

Вывод формул амплитудного значения тока и тангенса сдвига фаз

Дифференциальное уравнение тока в цепи с последовательно соединенными емкостью, индуктивностью и омическим сопротивлением имеет вид:

$$L \frac{d^2 I}{dt^2} + R \frac{dI}{dt} + \frac{I}{C} = \varepsilon_0 \omega \cdot \cos \omega t. \quad (121)$$

Решением этого уравнения является выражение:

$$I = I_0 \cdot \sin(\omega t - \varphi). \quad (122)$$

Для определения I_0 и φ найдем первую и вторую производные от тока (122) по времени и подставим в исходное дифференциальное уравнение (121):

$$L \cdot (-\omega^2 \cdot I_0 \cdot \sin(\omega t - \varphi)) + R \cdot I_0 \cdot \omega \cdot \cos(\omega t - \varphi) + \frac{I_0}{C} \cdot \sin(\omega t - \varphi) = \varepsilon_0 \cdot \omega \cdot \cos \omega t$$

или

$$R \cdot I_0 \cdot \cos(\omega t - \varphi) - \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \cdot I_0 \cdot \sin(\omega t - \varphi) = \varepsilon_0 \cdot \cos \omega t.$$

Выразив $\cos(\omega t - \varphi)$ и $\sin(\omega t - \varphi)$ через синусы и косинусы ωt и φ , получим:

$$\begin{aligned} R \cdot I_0 \cdot \cos \omega t \cdot \cos \varphi + R \cdot I_0 \cdot \sin \omega t \cdot \sin \varphi - \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \cdot I_0 \cdot \sin \omega t \cdot \cos \varphi + \\ + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \cdot I_0 \cdot \cos \omega t \cdot \sin \varphi - \varepsilon_0 \cdot \cos \omega t = 0 \end{aligned} \quad (123)$$

Так как равенство (123) должно быть равно нулю в любой момент времени, то множители перед $\cos \omega t$ и $\sin \omega t$ должны быть равны нулю:

$$R \cdot I_0 \cdot \sin \varphi - \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \cdot I_0 \cdot \cos \varphi = 0, \quad (124)$$

$$R \cdot I_0 \cdot \cos \varphi + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \cdot I_0 \cdot \sin \varphi = \varepsilon_0. \quad (125)$$

Из уравнения (124) получим:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}. \quad (126)$$

Возведя равенства (124) и (125) почленно в квадрат и складывая их, получим:

$$R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2 = \frac{\varepsilon_0^2}{I_0^2}. \quad (127)$$

Откуда

$$I_0 = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \quad (128)$$

(это действительно окончание сборника. Следующая страница очевидно обложка)

Учебное здание

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ. СБОРНИК ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ «ПО КУРСУ
ФИЗИКА». РАЗДЕЛ «ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ».

Составители

Бондарева Зоя Сергеевна
Коровина Галина Егоровна
Лебедева Валентина Дмитриевна
Петрова Нина Александровна
Удальцов Виктор Екимович
Шубин Валерий Валентинович

Лицензия ЛР № 020815 от 20.09.93

Подписано в печать

Формат 60* 84 1/16

Уч. – изд. л.

Тираж Заказ №

Издательско-полиграфический центр Новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого: 173003, Великий Новгород, Б. С.-Петербургская, 41. Отпечатано в ИПЦ НовГУ, 173003, Великий Новгород, Б. С.-Петербургская, 41.