

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра физики

ФИЗИКА

Магнетизм

*Лабораторный практикум*

Минск  
БГАТУ  
2009

УДК 53(076.5)  
ББК 22.3я7  
Ф 50

Рекомендовано научно-методическим советом агроэнергетического факультета БГАТУ

Протокол № 4 от 10 декабря 2008 г.

Составители:

д-р физ.-мат. наук, доц. *В.Р. Соболев*;  
канд. физ.-мат. наук, доц. *В.П. Дымонт*;  
д-р физ.-мат. наук, доц. *В.Ф. Гременок*;  
канд. техн. наук, доц. *П.Н. Логвинович*;  
канд. техн. наук, доц. *В.В. Хроленок*;  
канд. физ.-мат. наук, доц. *Г.М. Чобот*;  
ст. преподаватель *В.А. Козик*

Рецензенты:

канд. физ.-мат. наук, доц. Учреждения образования «Белорусский национальный технический университет» *Е.Е. Трофименко*;  
канд. физ.-мат. наук, доц. Учреждения образования «Минский государственный высший авиационный колледж» *А.И. Кириленко*

**Физика. Магнетизм** : лаб. практикум / В.Р. Соболев [и др.]. — Минск : БГАТУ, 2009. — 76 с.

ISBN 978-985-519-135-4

Издание включает семь лабораторных работ по магнетизму. Каждая работа содержит краткое теоретическое введение, описание идеи метода измерений и экспериментальных установок, методики измерений, обработки и представления результатов, подробную схему отчета и набор контрольных вопросов и заданий.

Предназначено для студентов агротехнических специальностей.

УДК 53(076.5)  
ББК 22.3я7

ISBN 978-985-519-135-4

© БГАТУ, 2009

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	4
Требования к выполнению лабораторных работ .....	5
1. Магнитное поле .....	10
Лабораторная работа 2.7	
«Изучение зависимости индукции магнитного поля от величины намагничивающего тока» .....	21
Лабораторная работа 2.8	
«Определение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли» .....	24
2. Магнитное поле в магнетиках .....	29
Лабораторная работа 2.9	
«Изучение зависимостей $B = B(H)$ и $\mu = \mu(H)$ ферромагнетиков» .....	36
Лабораторная работа 2.10	
«Изучение явления гистерезиса у ферромагнетиков» ...	40
Лабораторная работа 2.11	
«Определение точки Кюри ферромагнетика» .....	45
3. Электромагнитная индукция .....	48
Лабораторная работа 2.12	
«Определение индуктивности соленоида методом Жубера» .....	54
4. Электромагнитные колебания в цепи квазистационарного тока .....	62
Лабораторная работа 2.13	
«Исследование затухающих колебаний в колебательном контуре» .....	66
Литература .....	71
Справочные сведения .....	72

## Введение

Магнетизм — особая форма взаимодействия между электрическими токами, между электрическими токами и магнитными материалами (веществами, имеющими магнитные моменты), а также раздел физики, изучающий это взаимодействие и свойства магнитных веществ (магнетиков).

В практикуме даны описания лабораторных работ по магнетизму, темы которых соответствуют программе курса общей физики.

Выполнение лабораторных работ поможет лучше усвоить изучаемый материал, приобрести навыки работы с оборудованием, научиться формулировать цели работы и делать выводы на основе полученных результатов. Для этого требуется изучить краткую теорию, приведенную в работе, прочитать соответствующие разделы конспекта лекций и учебника, разобраться в схеме экспериментальной установки и принципах ее работы, провести измерения, расчеты и сделать необходимые выводы. К каждой работе приведены вопросы и задания для контроля, на которые студент должен уметь ответить при получении допуска к выполнению работы и при последующей защите полученных результатов.

## I. Требования к выполнению лабораторных работ

### Допуск к лабораторной работе

Перед выполнением лабораторной работы студент должен получить у преподавателя допуск для выполнения работы. Допуск проводится преподавателем побригадно с персональным опросом каждого студента. Для того чтобы получить допуск к лабораторной работе студент должен:

- заранее оформить конспект данной лабораторной работы;
- ответить на вопросы преподавателя по теории, методике измерений, устройству установки и методике обработки результатов. (письменно в черновике конспекта или устно).

Преподаватель допускает студента к работе и ставит свою подпись в конспекте студента (графа ДОПУСК в табличке на обложке).

### Выполнение лабораторной работы

Учитывая указания преподавателя, студент получает и заносит в таблицы экспериментальные данные; проводит расчеты; строит графики и т. п.

Выполнив необходимые действия, показывает конспект преподавателю и при правильном результате получает его подпись в графе ИЗМЕРЕНИЯ.

### Защита лабораторной работы

К защите лабораторной работы должен быть представлен полностью оформленный конспект. Должны быть выполнены все пункты раздела описания “Оформление конспекта к лабораторной работе” (в черновике представлены все расчеты, заполнены чернилами все таблицы, построены все графики).

Преподаватель проверяет правильность и полноту оформления конспекта, задает вопросы по теории, методике измерений, устройству установки, методике обработки результатов, обоснованности выводов по отдельным результатам работы и всей работе в целом. Если студент справился с заданиями, он получает подпись преподавателя в графе ЗАЧЕТ. Работа считается выполненной и защищенной.

Студент, не получивший на занятиях допуска к лабораторной работе, к выполнению работы не допускается (причина не выполнения работы считается неуважительной).

Выполненные работы должны быть защищены на текущем или на следующем занятии.

Если студент имеет две незащищенные работы, то до их защиты к выполнению следующих работ он не допускается (причина невыполнения считается неуважительной).

Выполнение всех лабораторных работ обязательно.

Лабораторные работы, не выполненные по уважительной причине, отрабатываются бесплатно (при наличии разрешения деканата) в течение двух недель от даты пропущенного занятия.

Лабораторные работы, не выполненные по неуважительной причине, отрабатываются на платной основе в течение двух недель от даты пропущенного занятия.

### Порядок отработки невыполненных лабораторных работ

Студент полностью выполняет требования к выполнению лабораторных работ. Выполняет лабораторную работу под руководством лаборанта, в дни, указанные заведующим кафедрой, или по согласованию с ведущим занятия преподавателем. Показывает полученные результаты и защищает лабораторную работу на общих основаниях.

### Оформление конспекта к лабораторной работе

Конспект для допуска и выполнения лабораторных работ готовится заранее на двойных листах из школьной тетради в клетку (1–5 двойных листов в зависимости от почерка).

Первая страница  
(обложка): →

БГАУ  
Кафедра физики

Лабораторная работа № \_\_\_\_\_

Название: \_\_\_\_\_

Выполнил:  
студент группы \_\_\_\_\_  
ФИО \_\_\_\_\_

	Допуск	Измерения	Зачет
Подпись и дата			

Минск 200\_

Следующие страницы:

вопросы и ответы для допуска к лабораторной работе

**ЧЕРНОВИК**

(здесь и далее на этой стороне должны быть представлены все расчеты, включая расчетные формулы и подстановку числовых значений)

**Цель и задачи работы:** (переписать полностью из описания или сформулировать самостоятельно).

**Краткая теория** (выписать основные определения и формулы и пояснить смысл каждого символа, входящего в формулу).

**Экспериментальная установка** (нарисовать чертеж и написать наименование деталей).

**Таблицы** (состав таблиц и их количество определить самостоятельно в соответствии с методикой измерений и обработкой их результатов).

**Оформление отчета** (переписать полностью из описания). Этот раздел в описании может иметь и другое название, например, "Обработка результатов и оформление отчета".

### Оформление отчета

Полностью оформленная и подготовленная к зачету работа должна соответствовать следующим требованиям:

- 1) должны быть выполнены *все пункты* раздела описания «Оформление конспекта к лабораторной работе» (в черновике представлены все расчеты, заполнены чернилами все таблицы, построены все графики и т. д.);
- 2) для всех величин, представленных в таблицах, должна быть записана соответствующая единица измерения.
- 3) графики должны удовлетворять требованиям, приведенным ниже.

### Г Р А Ф И К (требования):

- должен быть построен на миллиметровой бумаге или на листе в клетку, размером не менее 1/2 тетрадного листа;
- на графике: оси декартовой системы, на концах осей — стрелки, обозначения величин, единицы измерения, множитель ( $10^N$ );
- на каждой оси выбран — равномерный масштаб (риски через равные промежутки, числа через равное количество рисок);
- под графиком должно быть полное название графика СЛОВАМИ;
- на графике должны быть нанесены — экспериментальные и теоретические точки ярко, разными значками;
- экспериментальная кривая на графике должна соответствовать теоретической зависимости (не ломаная линия, соединяющая экспериментальные точки);
- должны быть записаны выводы по каждому графику (см. шаблон).

### ВЫВОД по ГРАФИКУ (шаблон):

Полученный экспериментально график зависимости

\_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ имеет вид (прямой, проходящей через начало координат, параболы, гиперболы, плавной кривой и т.п.) и качественно совпадает (не совпадает) с теоретической зависимостью данной характеристики, имеющей вид

\_\_\_\_\_ формула

- 4) выписан ответ по установленной форме (см. шаблон).

**ОТВЕТ (шаблон):** По результатам измерений и расчетов получено значение \_\_\_\_\_, равное \_\_\_\_\_ =

( $\frac{\text{среднее}}{\text{число измерений}} \pm \frac{\text{ошибка}}{\text{число измерений}}$ ) · 10<sup>степень</sup>

**ВЫВОД по ОТВЕТУ (шаблон):**  
Полученное экспериментально значение величины \_\_\_\_\_, равное \_\_\_\_\_, с точностью до ошибки измерений, составляющей \_\_\_\_\_, совпадает (не совпадает) с табличным (теоретическим) значением данной величины, равным \_\_\_\_\_.

## 1. Магнитное поле

### Краткая теория

Магнитным полем называется особый вид материи, который проявляется в силовом магнитном взаимодействии. Это поле действует на движущиеся электрические заряды и на тела, обладающие магнитным моментом. Магнитное поле характеризуется вектором индукции (магнитной индукции)  $\vec{B}$  и напряженности  $\vec{H}$ . Значение индукции  $\vec{B}$  определяет силу, действующую в данной точке поля на движущийся электрический заряд, или на тела, имеющие магнитный момент.

Источником магнитного поля являются проводники с током, намагниченные тела, движущиеся электрические заряды. Во всех случаях магнитное поле возникает как результат перемещения микроскопических заряженных частиц — электронов, протонов, ионов и т. д., а также благодаря наличию у микрочастиц собственного магнитного момента.

Для практически любых проводников с током выполняется принцип квазинейтральности. То есть, несмотря на движение заряженных частиц внутри проводника, любой не слишком малый его объем имеет нулевой суммарный электрический заряд. Как следствие между обычными проводами с током наблюдается только магнитное взаимодействие.

**Взаимодействие токов вызывается их магнитными полями, а именно магнитное поле одного тока действует силой Ампера на другой ток и наоборот.**

Опыт показывает, что модуль силы, действующей на отрезок длиной  $\Delta l$  каждого из проводников, прямо пропорционален силам тока  $I_1$  и  $I_2$  в проводниках, длине отрезка  $\Delta l$  и обратно пропорционален расстоянию  $R$  между ними:

$$F = \frac{\mu_0 \mu}{2\pi} \frac{I_1 I_2 \Delta l}{R},$$

где  $\mu_0$  — постоянная размерная величина, которую называют **магнитной постоянной**,  $\mu$  — магнитная проницаемость среды, в которой находятся проводники. Эта безразмерная характеристика описывает свойства среды усиливать либо ослаблять магнитное поле внешнего источника. Введение магнитной постоянной  $\mu_0$  упрощает запись ряда формул. Ее численное значение равно  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м. Из размерности формулы для силы взаимодействия между провод-

никами следует, что  $\text{Гн/м} = \text{Н/А}^2$ . По своим характеристикам среды разделяются на магнитные, упорядочивающиеся во внешнем поле, и на нечувствительные к внешнему полю. Упорядочивающиеся среды — ферро-, антиферро-, ферримагнетики усиливают внешнее магнитное поле, у них магнитная проницаемость лежит в диапазоне значений десятков, сотен и тысяч единиц. Указанные материалы втягиваются в область сильного магнитного поля. Среда, которая ослабляет внешнее магнитное поле — диамагнетики имеют магнитную проницаемость от единицы до нуля. При этом нулевое значение магнитной проницаемости отвечает идеальным диамагнетикам, к которым относятся материалы в состоянии сверхпроводимости. Диамагнетики выталкиваются из области сильного магнитного поля. Значение  $\mu$  строго равно единице или близкое к ней отвечает слабым магнетикам (парамагнетики, неидеальные диамагнетики, которые почти не реагируют на воздействие внешнего магнитного поля). К подобным материалам относятся воздух, инертные газы, металлы алюминий, медь, серебро, висмут, индий.

Магнитное взаимодействие параллельных проводников с током используется в Международной системе единиц (СИ) для определения единицы силы тока — ампера:

**Ампер** — сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, вызвал бы между этими проводниками силу магнитного взаимодействия, равную  $2 \cdot 10^{-7}$  Н на каждый метр длины.

Аналогично тому, как при исследовании электростатического поля используется точечный пробный заряд, при исследовании магнитного поля применяют пробный контур — замкнутый плоский контур с током (рамка с током) (рисунок 1). Линейные размеры пробного контура малы по сравнению с расстоянием до токов, образующих внешнее магнитное поле. Собственное магнитное поле пробного контура также мало и не изменяет конфигурацию внешнего зондируемого поля. Ориентация контура в пространстве характеризуется направлением нормали  $\vec{n}$  к контуру. В качестве положительного направления нормали принимается направление, связанное с направлением тока правилом правого винта (буравчика): **За положительное направление нормали принимается направление поступательного движения правого винта, головка которого вращается в направлении тока, текущего в рамке.**

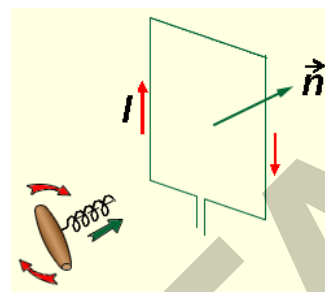


Рисунок 1 — Пробный контур

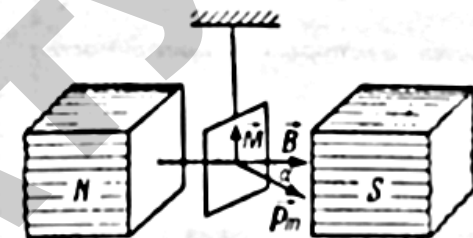


Рисунок 2 — Рамка с током в магнитном поле

Магнитное поле оказывает на рамку с током ориентирующее действие, поворачивая ее определенным образом (рисунок 2). Это свойство используется для выбора **направления магнитного поля**. **За направление магнитного поля в данной точке принимается направление, вдоль которого располагается положительная нормаль к свободно подвешенной рамке с током**, или направление, совпадающее с силой, действующей на северный полюс (N) магнитной стрелки, помещенной в данную точку пространства.

Вращающий момент сил зависит как от свойств поля в данной точке, так и от свойств рамки с током и определяется векторным произведением  $\vec{M} = [\vec{p}_m, \vec{B}]$ , где  $\vec{p}_m$  — вектор магнитного момента

рамки с током,  $\vec{B}$  — вектор магнитной индукции, как уже упоминалось выше, силовая характеристика магнитного поля. По определению векторного произведения модуль вращающего момента:  $M = p_m B \sin \alpha$ , где  $\alpha$  — угол между векторами  $\vec{p}_m$  и  $\vec{B}$ .

Для плоского контура с током  $I$  магнитный момент определяется:  $\vec{p}_m = IS\vec{n}$ , где  $S$  — площадь поверхности контура (рамки),  $\vec{n}$  — единичный вектор нормали к поверхности рамки.

Если в данную точку магнитного поля помещать рамки с различными магнитными моментами, то на них действуют различные вращающие моменты, но отношение  $\frac{M_{\max}}{p_m}$  для всех контуров одно

и то же.

Аналогично тому, как силовая векторная характеристика электростатического поля — напряженность — определялась как сила,



действующая на единичный пробный заряд, **силовая характеристика магнитного поля** — **магнитная индукция**  $\vec{B}$  — **определяется максимальным вращающим моментом, действующим на рамку с магнитным моментом, равным единице, когда нормаль к рамке перпендикулярна направлению поля.** В системе единиц СИ за единицу магнитной индукции принята индукция такого магнитного поля, в котором на рамку с магнитным моментом, равным  $1 \text{ А} \cdot \text{м}^2$  действует максимальный вращающий момент  $1 \text{ Н} \cdot \text{м}$ . Эта единица называется **тесла** (Тл).  $1 \text{ Тл} = 1 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А} \cdot \text{м}^2}$ .

Тесла — очень крупная единица. Магнитное поле Земли приблизительно равно  $0,5 \times 10^{-4}$  Тл. Большой лабораторный электромагнит может создать поле не более 15 Тл.

Графически магнитное поле, так же как электрическое поле, изображают с помощью **линий магнитной индукции** — линий, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора  $\vec{B}$ . Густота магнитных линий указывает величину индукции.

**Линии магнитной индукции всегда замкнуты** и охватывают проводники с током, в то время, как **линии напряженности электростатического поля — разомкнуты** (они начинаются на положительных и заканчиваются на отрицательных зарядах).

Магнитное поле постоянных токов различной конфигурации изучалось экспериментально французскими учеными Ж. Био и Ф. Саваром (1820 г.). Они пришли к выводу, что индукция магнитного поля токов, текущих по проводнику, определяется совместным действием всех отдельных участков проводника. Магнитное поле подчиняется **принципу суперпозиции**:

**Если магнитное поле создается несколькими проводниками с током, то индукция результирующего поля есть векторная сумма индукций полей, создаваемых каждым проводником в отдельности.**

Это означает, что индукцию  $\vec{B}$  проводника с током можно представить как векторную сумму элементарных индукций  $d\vec{B}$ , создаваемых отдельными участками проводника (рисунок 3). На опыте невозможно реализовать отдельный участок проводника с током, так как постоянные токи всегда замкнуты. Соответственно на опыте можно измерить только суммарную индукцию магнитного поля, создаваемого всеми элементами тока. **Закон Био–Савара–Лапласа**

определяет вклад  $d\vec{B}$  в магнитную индукцию  $\vec{B}$  результирующего магнитного поля, создаваемый малым участком  $d\vec{l}$  проводника с током  $I$ :

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu I}{4\pi r^3} [d\vec{l}, \vec{r}],$$

где  $r$  — расстояние от данного участка  $d\vec{l}$  до точки наблюдения,  $\alpha$  — угол между направлением на точку наблюдения и направлением тока на данном участке,  $\mu$  — магнитная проницаемость среды, в которой находится проводник,  $\mu_0$  — магнитная постоянная. Направление вектора  $d\vec{B}$  перпендикулярно  $d\vec{l}$  и  $\vec{r}$  и совпадает с касательной к линии магнитной индукции. Модуль вектора  $d\vec{B}$  определяется выражением

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

Закон Био–Савара–Лапласа позволяет рассчитывать магнитные поля линейных токов различных конфигураций.

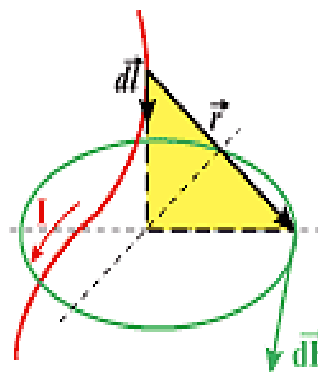


Рисунок 3

Действие магнитного поля на рамку с током — это пример воздействия магнитного поля на проводник с током. Ампер установил, что сила  $d\vec{F}$ , с которой магнитное поле действует на элемент проводника  $dl$  с током  $I$ , находящимся в магнитном поле:

$$d\vec{F} = I [d\vec{l}, \vec{B}],$$

где  $d\vec{l}$  — вектор по модулю равный  $dl$  и совпадающий по направлению с током,  $\vec{B}$  — вектор магнитной индукции.

Эта сила называется **силой Ампера**. Она достигает максимального по модулю значения  $F_{\max}$ , когда проводник с током ориентирован перпендикулярно линиям магнитной индукции. Сила Ампера направлена перпендикулярно вектору магнитной индукции  $\vec{B}$  и направлению тока, текущего по проводнику. Для определения направления силы Ампера обычно используют **правило левой руки**: если расположить левую руку так, чтобы линии индукции  $\vec{B}$  входили в ладонь, а вытянутые пальцы были направлены вдоль тока, то отведенный большой палец укажет направление силы, действующей на проводник (рисунок 4).

Если угол  $\alpha$  между направлениями вектора  $\vec{B}$  и тока в проводнике отличен от  $90^\circ$ , то для определения направления силы Ампера  $\vec{F}$  более удобно пользоваться **правилом буравчика**: воображаемый буравчик располагается перпендикулярно плоскости, содержащей вектор  $\vec{B}$  и проводник с током, затем его рукоятка поворачивается

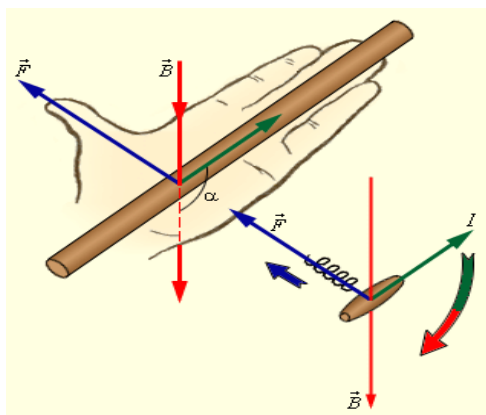


Рисунок 4 — Правило левой руки и правило буравчика

от направления тока к направлению вектора  $\vec{B}$  по кратчайшему пути. Поступательное перемещение буравчика будет показывать направление силы Ампера  $\vec{F}$ .

Расчеты магнитного поля токов часто упрощаются при учете симметрии в конфигурации токов, создающих поле, и симметрии магнитных силовых линий. В этом случае расчеты можно выполнять с помощью **теоремы о циркуляции вектора напряженности магнитного поля**.

Вектор напряженности магнитного поля является дополнительным вектором к вектору индукции. Напряженность, в частности, описывает магнитное поле, вызванное только движением зарядов без учета намагнитченности, связанной с наличием собственных магнитных моментов в веществе. Теорема о циркуляции вектора напряженности в теории магнитного поля играет ту же роль, что и теорема Гаусса в электростатике.

Пусть в пространстве, где создано магнитное поле, выбран некоторый условный замкнутый контур и указано положительное направление обхода контура (рисунок 5). На каждом отдельном малом участке  $\Delta l$  этого контура можно определить касательную составляющую  $H_l$  вектора  $\vec{H}$  в данном месте, то есть определить проекцию вектора  $\vec{H}$  на направление касательной к данному участку контура.

Циркуляцией вектора  $\vec{H}$  называют предел суммы произведений  $H_l \Delta l$ , взятой по всему контуру  $L$  при  $\Delta l \rightarrow 0$ :

$$\lim_{\Delta l \rightarrow 0} \sum_{(L)} H_l \Delta l = \oint_{(L)} H_l dl = \oint_{(L)} \vec{H} d\vec{l}.$$

В данном случае циркуляция понимается как сумма скалярных произведений вектора напряженности на элементарное перемещение вдоль замкнутого контура.

Теорема о циркуляции вектора напряженности магнитного поля: циркуляция вектора напряженности магнитного поля  $\vec{H}$  по любому контуру  $L$  равна алгебраической сумме всех токов, протекающих через поверхность, ограниченную заданным контуром:

$$\oint_{(L)} \vec{H} d\vec{l} = \oint_{(L)} H_l dl = \sum_{k=1}^n I_k$$

Вектор напряженности магнитного поля  $\vec{H}$  является дополнительным вектором к силовому вектору индукции магнитного поля  $\vec{B}$ . Векторы  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$  между собой связаны наподобие векторов напряженности электрического поля  $\vec{E}$  и электрического смещения  $\vec{D}$ . А именно в материальных средах  $\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}$ . Если среда однородная и изотропная, то умножением полученного выражения для циркуляции  $\vec{H}$  на  $\mu_0 \mu$  легко получить выражение для расчета индукции магнитного поля (рисунок 5).

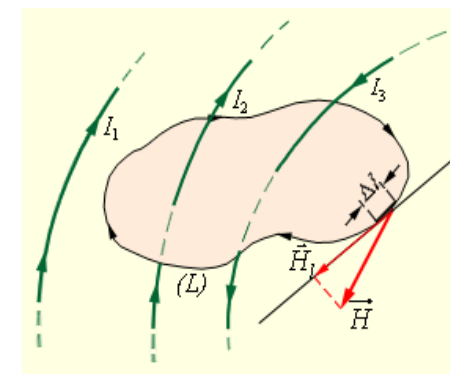


Рисунок 5 — К теореме о циркуляции вектора магнитной индукции



$$\oint_{(L)} \vec{B} d\vec{l} = \oint_{(L)} B_l dl = \mu_0 \mu \sum_{k=1}^n I_k$$

Для представленного на рисунке 5 распределения токов теорема о циркуляции выражается соотношением:

$$\oint_{(L)} \vec{B} d\vec{l} = \oint_{(L)} B_l dl = \mu_0 \mu (I_3 - I_2).$$

Для прямолинейного бесконечно длинного проводника с током симметрия линий напряженности и индукции в изотропной среде позволяет определить величину магнитного поля в любой точке на расстоянии  $r$  от оси проводника. Линии напряженности и магнитной индукции поля прямолинейного проводника представляют собой концентрические окружности, лежащие в плоскостях, перпендикулярных проводнику. Вдоль линии напряженности (индукция) магнитного поля одинакова и циркуляция равна произведению напряженности (индукции) на длину линии. Соответственно величина индукции:

$$B = \frac{\mu_0 \mu I}{2\pi r}.$$

Закон Био–Савара–Лапласа также позволяет получить значение индукции магнитного поля прямого бесконечно длинного проводника с током, а также значение магнитного поля от конечного участка проводника, но расчет существенно сложнее. В целом при отсутствии круговой симметрии силовых магнитных линий расчет поля осуществляется только на основе закона Био–Савара–Лапласа. В частности индукция магнитного поля на оси кругового контура (витка) радиуса  $R$  с током  $I$  на расстоянии  $r$  от центра витка:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu}{2\pi} \frac{\vec{p}_m}{(R^2 + r^2)^{3/2}} = \frac{\mu_0 \mu}{2} \frac{Ir^2}{(R^2 + r^2)^{3/2}} \vec{n},$$

где  $\vec{p}_m = IS\vec{n}$  — магнитный момент витка.

Соленоидом называется длинная прямая катушка с током. Величина индукции магнитного поля вблизи центра соленоида меняется очень мало. Такое поле можно считать практически однородным. Из закона о циркуляции магнитного поля можно получить формулу для

индукции магнитного поля в центре соленоида  $B = \mu_0 \mu n I$ , где  $n$  — число витков, приходящихся на единицу длины соленоида.

### Магнитное поле Земли

Магнитное поле Земли лучше всего описывается полем геоцентрического диполя с наклоном оси по отношению к оси вращения Земли в  $11,5^\circ$  (рисунок 6).

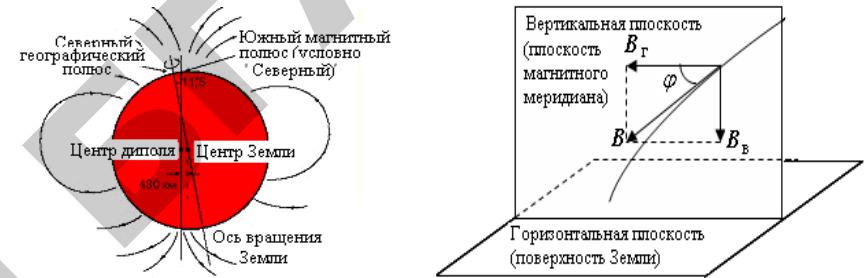


Рисунок 6 — Магнитное поле Земли

Центр геоцентрического диполя — элементарного бесконечно малого магнита смещен в Восточное полушарие от центра Земли на 430 км. Силовые линии магнитного поля «входят» в планету вблизи Северного географического полюса и «выходят» вблизи Южного. Там, где силовые линии «входят» в земной шар, располагается Южный магнитный полюс. Следовательно, истинный Южный магнитный полюс находится вблизи Северного географического полюса. Исторически сложилось, что Южный магнитный полюс для удобства иногда называют Северным.

Вектор индукции магнитного поля Земли образует с плоскостью горизонта угол  $\varphi$ , который называется магнитным наклоном (см. рисунок 6). Этот вектор можно разложить на две взаимно перпендикулярные составляющие: горизонтальную  $B_H$  — вдоль линии горизонта (параллельно поверхности Земли) и вертикальную  $B_V$  — в плоскости магнитного меридиана (перпендикулярно поверхности Земли). Зная угол  $\varphi$  и величину горизонтальной составляющей  $B_H$

можно определить величину индукции магнитного поля Земли

$$B = \frac{B_r}{\cos \varphi}.$$

Напряженность магнитного поля Земли в настоящее время составляет около 0,1 А/м, и считается, что в геологическом прошлом величина напряженности могла колебаться, но отклонялась максимум на порядок ныне существующей величины. Геоманнитное поле Земли за последние 2,0–2,5 млрд лет, что составляет больше половины ее геологической истории, принципиально не изменялось.

Происхождение магнитного поля Земли и по сей день остается загадкой для ученых, хотя существует много гипотез для объяснения этого феномена. Считается, что магнитное поле, которое существует у земной поверхности, является суммарным полем, образованным за счет ряда источников:

- 1) токов, пересекающих поверхность Земли, так называемого «вихревого» поля;
- 2) внешних, космических источников, не связанных с Землей;
- 3) магнитного поля, обусловленного причинами внутренней динамики Земли. Этот последний источник вносит наибольший вклад в формирование геомагнитного поля и именно его генезису посвящено большинство гипотез.

Внутреннее строение Земли (рисунок 7) сейчас хорошо изучено с помощью сейсмических волн, возникающих от землетрясений и искусственных взрывов и пронизывающих Землю по всем направлениям, как бы «просвечивая» ее. Установлено, что до глубины 2900 км вещество сферических оболочек Земли твердое, а ниже вплоть до уровня 5120 км обладает свойствами жидкости, так как через него не проходят поперечные сейсмические волны. В поперечных акустических волнах частицы колеблются перпендикулярно направлению распространения волны. Модуль сдвига в жидкости равен нулю, и именно поэтому внешнему ядру приписываются свойства жидкости. Внутреннее ядро с глубины 5120 км и до центра Земли (6371 км) является твердым веществом.

Проблема происхождения магнитного поля Земли до настоящего времени не может считаться окончательно решенной, хотя почти общепризнанной является гипотеза магнитного гидродинамо, основанная на признании существования жидкого внешнего ядра. Тепловая конвекция (перемешивание вещества во внешнем ядре) способствует образованию кольцевых электрических токов. **Скорость перемещения вещества в верхней части жидкого ядра будет не-**

**сколько меньше, а нижних слоев — больше относительно мантии в первом случае и твердого ядра — во втором.** Подобные медленные течения вызывают формирование кольцеобразных (тороидальных) замкнутых по форме электрических полей, не выходящих за пределы ядра. Благодаря взаимодействию тороидальных электрических полей с конвективными течениями во внешнем ядре возникает суммарное магнитное поле дипольного характера, ось которого примерно совпадает с осью вращения Земли.



Рисунок 7 — Строение Земли

Для «запуска» подобного процесса необходимо начальное, хотя бы очень слабое, магнитное поле, которое может генерироваться гироманнитным эффектом, когда вращающееся тело намагничивается в направлении оси его вращения.

## Лабораторная работа 2.7

### «Изучение зависимости индукции магнитного поля от величины намагничивающего тока»

Ознакомьтесь с конспектом лекций и учебником (Савельев, т.2, §§ 35–46).

**Цель работы** – выработать навыки проведения эксперимента, анализа экспериментальных данных и расчета погрешностей измерений.

#### Задачи работы:

- 1) экспериментально подтвердить закономерности взаимодействия проводника с током и магнитного поля;
- 2) экспериментально изучить зависимость индукции магнитного поля от величины намагничивающего тока.

#### Вопросы для допуска к лабораторной работе

1. Что называется магнитным полем?
2. Назовите источники магнитного поля.
3. Что такое магнитный момент витка с током?
4. Как определить направление магнитного поля в данной точке пространства, имея пробный контур?
5. Дайте определение индукции магнитного поля?

#### Методика и порядок измерений

На прямолинейный проводник длиной  $l$  с током  $I$ , помещенный в однородное магнитное поле с индукцией  $B$ , действует сила Ампера  $F = BIl \sin \alpha$ , где  $\alpha$  — угол между направлениями тока в проводнике и индукции магнитного поля. Подвесим проводник к одному из плеч рычажных весов и уравновесим весы при выключенном токе. Тогда при наличии магнитного поля и тока в проводнике весы выйдут из равновесия из-за появления силы Ампера. При направлениях индукции и тока, показанных на схеме, сила Ампера направлена вертикально вверх. Весы можно вернуть в положение равновесия, приложив к проводнику силу, направленную вертикально вниз и равную по величине силе Ампера. Конструкция весов позволяет создать такую силу, равную весу положенного на чашку весов груза массой  $m$ .

Из условия равновесия проводника получаем  $B = \frac{mg}{Il}$ .

## Измерения

1. Ознакомьтесь с принципиальной схемой лабораторной установки, проверьте правильность ее сборки (рисунок 8).

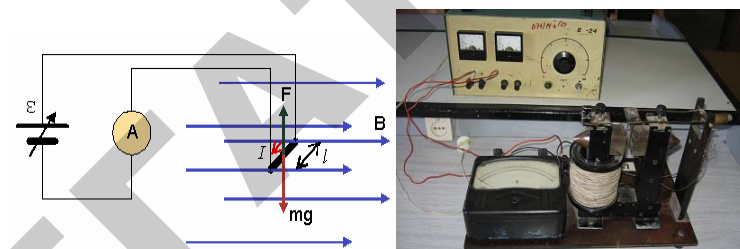


Рисунок 8. Принципиальная схема и общий вид лабораторной установки:  $\mathcal{E}$  — регулируемый источник питания; А — амперметр;  $l$  — участок проводника, на который действует вертикальная сила Ампера  $F$ ; В — линии индукции магнитного поля

2. Получите у преподавателя задание на выполнение работы.
3. Установите в равновесие подвижную систему.
4. Нагрузите чашечку весов грузом минимальной массы.
5. Изменяя силу тока в цепи при помощи регулируемого источника тока, верните подвижную систему в состояние равновесия. Запишите значение этого тока в соответствующую строчку таблицы 1.

Таблица 1

№ измерения	$m$ , кг	$I$ , А	$B$ , Тл
1.			
•			
•			
•			
10.			

6. Увеличивая массу грузов каждый раз на 100 мг, проведите измерения соответствующих значений силы тока.

7. Рассчитайте значение  $B = \frac{mg}{Il}$  для каждого измерения, предварительно измерив длину  $l$ .

8. По экспериментальным данным, постройте график зависимости  $B = f(I)$ .

9. Сформулируйте выводы по ответу.

## Вопросы и задания для контроля

### I уровень

1. Сформулируйте закон Ампера.
2. Как определить направление силы Ампера?
3. Как взаимодействуют между собой два параллельных провода с током.
4. Дайте определение основной единицы системы СИ — Ампера.
5. Что такое соленоид и для чего он используется?

### II уровень

6. Опишите метод определения индукции магнитного поля, используемый в данной работе.
7. Чему равно магнитное поле в центре соленоида?
8. Является ли магнитное поле внутри соленоида точно однородным?
9. Как устроен электромагнит. Для чего нужен ферромагнитный сердечник?
10. Какой вид зависимости  $B(I)$  должен наблюдаться для электромагнита с ферромагнитным сердечником?

### III уровень

11. Напряженность магнитного поля  $H = 100$  А/м. Вычислить магнитную индукцию  $B$  этого поля в вакууме. (Ответ: 126 мкТл).
12. По витку радиусом  $R = 10$  см течет ток  $I = 50$  А. Виток помещен в однородное магнитное поле с индукцией  $B = 0,2$  Тл. Определить момент сил  $M$ , действующей на виток, если плоскость витка составляет угол  $\varphi = 60^\circ$  с линиями индукции.

## Лабораторная работа 2.8

### «Определение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли»

Ознакомьтесь с конспектом лекций и учебником (Савельев, т.2, §§ 35–46).

**Цель работы** — выработать навыки проведения эксперимента, анализа экспериментальных данных и расчета погрешностей измерений.

#### Задачи работы:

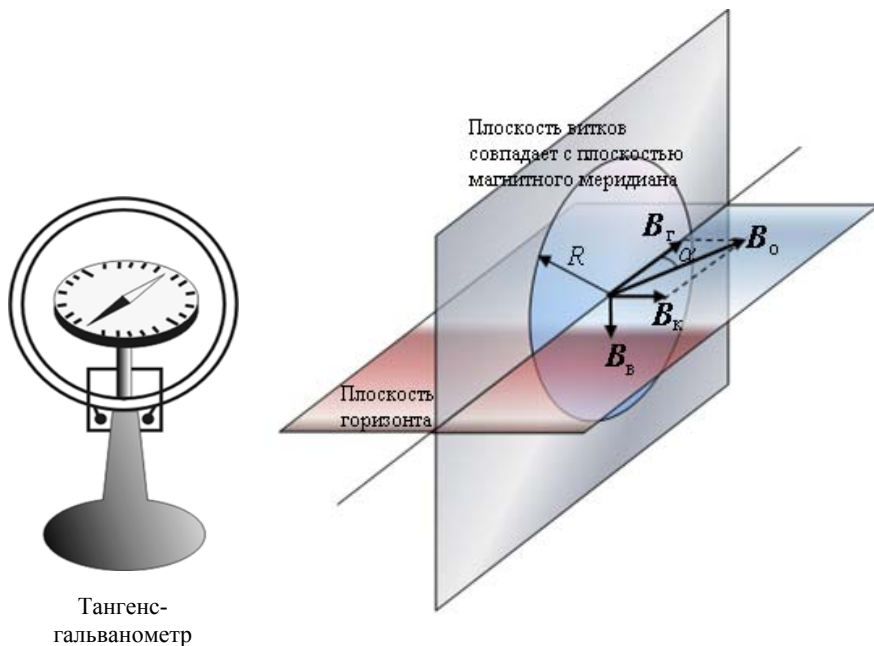
- 1) ознакомиться с элементами земного магнетизма;
- 2) экспериментально подтвердить закономерности для магнитного поля кругового витка (контура) с током;
- 3) экспериментально определить горизонтальную составляющую индукции магнитного поля Земли.

#### Вопросы для допуска к лабораторной работе

1. Дайте представление о магнитном поле Земли.
2. На что похоже магнитное поле Земли?
3. Какую роль играет магнитное поле Земли в жизни?
4. Какую величину имеет индукция магнитного поля Земли?

#### Методика и порядок измерений

Для определения величины горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли используется тангенс-гальванометр (рисунок 9). Он представляет собой несколько вертикальных проводочных круговых витков, в центре которых на вертикальной оси расположена магнитная стрелка. Поверх стрелки укреплен тонкий круглый диск со шкалой, поделенной на градусы. На оправе имеется приспособление (специальный окуляр) для отсчета угла. При отсутствии тока в витках тангенс-гальванометра магнитная стрелка под действием магнитного поля Земли установится в плоскости магнитного меридиана практически горизонтально, т. к. действие вертикальной составляющей компенсируется силой трения в точке опоры. Плоскость витков тангенс-гальванометра также совместим с плоскостью магнитного меридиана.



Тангенс-гальванометр  
Рисунок 9 — Определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли с помощью тангенс-гальванометра

При пропускании по виткам постоянного тока силой  $I$  на магнитную стрелку будет действовать еще и магнитное поле кругового тока с индукцией  $B_k = \frac{\mu_0 \mu n I}{2R}$  ( $n$  — число витков,  $R$  — радиус витков), направленной перпендикулярно плоскости витков. В соответствии с принципом суперпозиции магнитная стрелка установится по направлению вектора  $\vec{B}_0 = \vec{B}_r + \vec{B}_k$ , отклонившись от плоскости магнитного меридиана на угол  $\alpha$ . Из рисунка видно, что

$$B_r = B_k \operatorname{ctg} \alpha = \frac{\mu_0 \mu n I}{2R \operatorname{tg} \alpha}.$$

### Измерения

1. Ознакомьтесь с принципиальной схемой лабораторной установки, проверьте правильность ее сборки (рисунок 10).

2. Установите плоскость витков в плоскости магнитного меридиана: поворачивая плоскость витков, необходимо получить показание  $90^\circ$  или  $270^\circ$ .

3. Получите у преподавателя задание для выполнения работы:  
— какую величину силы тока установить;  
— какое количество витков катушки выбрать;  
— величины силы тока и количества витков занесите их таблицу.

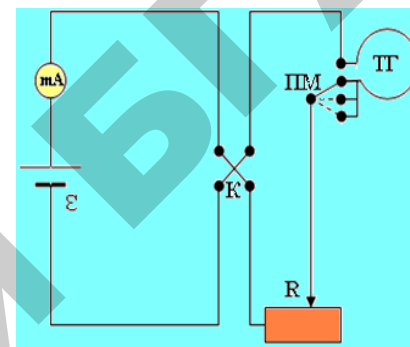


Рисунок 10 — Принципиальная схема и общий вид лабораторной установки:  
 $\mathcal{E}$  — источник питания, mA — миллиамперметр, K — переключатель направления тока в витках, ТГ — витки тангенс-гальванометра, ПМ — перемычка для выбора количества витков, R — реостат

4. Поставьте перемычку ПМ в требуемое положение. Включите источник питания в сеть. Установите с помощью реостата требуемую силу тока.

5. Снимите показание тангенс-гальванометра  $\alpha_1$ .

6. Поменяйте с помощью переключателя K направление тока в витках и снимите показание тангенс-гальванометра  $\alpha_2$ .

7. Определите величину  $\alpha$  по формуле:  $\alpha = \left| \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2} \right|$ .

8. Изменив по указанию преподавателя величину силы тока или количества витков, определите таким же образом еще несколько значений  $\alpha$  и занесите их таблицу.

9. Рассчитайте значение  $B_r = \frac{\mu_0 \mu n I}{2R \operatorname{tg} \alpha}$  для каждого измерения.



10. Найдите среднее значение  $B_r$ , среднюю абсолютную погрешность  $\Delta B_r$  и относительную погрешность  $\delta B_r$ . Результаты измерений и расчетов занесите в таблицу 2.

Таблица 2

№ измерения	$n$	$I, A$	$\alpha$ , град	$B_r$ , Тл	$\Delta B_r$ , Тл	$\delta B_r$
1.			$\alpha_1 =$			
			$\alpha_2 =$			
2.			$\alpha_1 =$			
			$\alpha_2 =$			
3.			$\alpha_1 =$			
			$\alpha_2 =$			
Среднее						

11. Запишите ответ. Сформулируйте выводы.

### Вопросы и задания для контроля

#### I уровень

1. Что такое магнитное поле?
2. Назовите источники магнитного поля.
3. Дайте определение линий индукции магнитного поля. Зачем их рисуют?
4. Сформулируйте принцип суперпозиции для магнитного поля.
5. Дайте определение циркуляции магнитного поля.
6. Сформулируйте теорему о циркуляции вектора индукции магнитного поля.
7. Запишите формулу для магнитного поля прямого провода с током.
8. Запишите формулу для магнитного поля на оси кругового витка (контура) с током.
9. Какую форму имеет линия индукции, проходящая через центр витка с током?

#### II уровень

10. Запишите закон Био–Савара–Лапласа. Находите ли Вы в нем сходство с законом Кулона?

11. Как выглядят линии индукции магнитного поля прямого провода с током?

12. Как с помощью тангенс-гальванометра определить индукцию магнитного поля Земли?

13. Почему Земля имеет магнитное поле?

#### III уровень

14. С XVI века, известно, что вертикально стоящие железные оконные решетки с течением времени намагничиваются. Объясните это явление. Какой вывод можно сделать из него относительно направления вектора индукции земного магнитного поля? На каком конце вертикального прута — верхнем или нижнем — возникает северный полюс и на каком — южный?

15. В книге одного из первых исследователей земного магнетизма Джильберта описан следующий опыт. Если бить молотком по железной полосе, расположенной с севера на юг, то полоса намагнитится. Объясните это явление. Укажите, как будут расположены северный и южный полюсы на намагнитившейся таким образом полосе?

16. Самопроизвольное намагничивание железных предметов в магнитном поле Земли было использовано для устройства магнитных мин, которые устанавливаются на некоторой глубине под поверхностью воды и взрываются при прохождении над ними корабля. Механизм, заставляющий мину всплывать и взрываться, приходит в действие, когда магнитная стрелка, вращающаяся вокруг горизонтальной оси, поворачивается под влиянием магнитного поля проходящего над миной железного корабля, который всегда оказывается самопроизвольно намагниченным (подобно железным решеткам в задаче 14). Предложите способы борьбы с магнитными минами.



## 2. Магнитное поле в магнетиках

### Краткая теория

Все вещества, помещенные во внешнее магнитное поле, как указано ранее, реагируют на воздействие этого поля и изменяют свое магнитное состояние, т. е. намагничиваются. Для объяснения многих магнитных явлений можно использовать квазиклассическую модель планетарной модели атома. Электроны, обращающиеся по орбитам, представляют собой замкнутые электрические токи (микротоки, существование которых предполагал еще Ампер). Эти микротоки ответственны за изменение магнитного состояния вещества.

Орбитальный магнитный момент электрона, движущегося с частотой  $\nu$  по круговой орбите радиуса  $r$ ,  $p_m = IS = e\nu\pi r^2$ , а его орбитальный механический момент количества движения (импульса)  $L = m\nu r = m2\pi\nu r^2$  (рисунок 11). Направления  $\vec{p}_m$  и  $\vec{L}$  противоположны. Поэтому  $\vec{p}_m = -\frac{e}{2m}\vec{L} = g\vec{L}$ , где величина  $g = -\frac{e}{2m}$  называется гиромагнитным отношением орбитальных моментов.

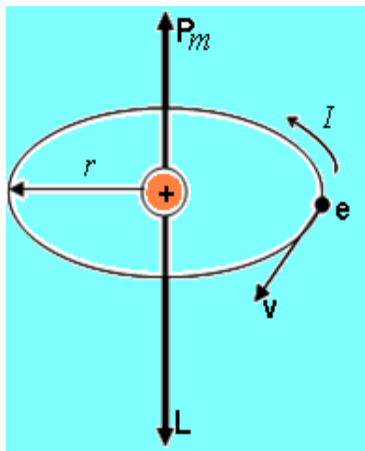


Рисунок 11 — Электрон, обращающийся по орбите

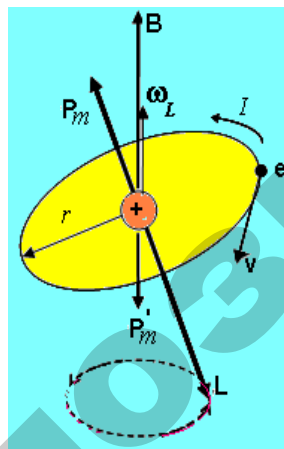


Рисунок 12 — Прецессия орбиты электрона во внешнем магнитном поле

Кроме орбитальных моментов, электрон обладает собственным механическим моментом импульса  $\vec{L}_s$ , называемым спином. Спину

электрона соответствует собственный (спиновый) магнитный момент  $\vec{p}_{ms}$ . Проекция спина на направление вектора  $\vec{B}$  может принимать только одно из следующих двух значений  $p_{msB} = \pm \frac{e\hbar}{2m} = \pm\mu_B$ ,

где  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$  ( $h$  — постоянная Планка),  $\mu_B$  — магнетон Бора, являющийся единицей магнитного момента электрона.

Орбитальные и спиновые магнитные моменты всех электронов в атоме (молекуле) складываются по законам квантовой механики и образуют полный магнитный момент атома (молекулы). Существенно, что результирующие как орбитальный, так и спиновый магнитные моменты атомов, имеющих полностью заполненные электронные оболочки, равны нулю.

Ядра атомов также обладают магнитными моментами, но в первом приближении ими можно пренебречь, так как они в сотни и тысячи раз меньше, чем у электронов.

Таким образом, магнитные моменты атомов могут быть равными нулю и отличными от нуля в зависимости от степени заполненности электронных оболочек.

При помещении атома во внешнее магнитное поле, в общем случае, когда направление поля не перпендикулярно к плоскости орбиты электрона, возникает момент сил, приводящий к наложению на первоначальное движение электрона равномерного вращения вокруг направления внешнего поля, что приводит к возбуждению прецессии орбиты вокруг направления поля (рисунок 12).

Прецессия — такое движение орбиты, при котором нормаль к ее плоскости описывает коническую поверхность. При этом возникает дополнительный момент импульса электрона и связанный с ним индуцированный магнитный момент  $\vec{p}'_m$ , направленный против внешнего поля. Указанная прецессия приводит к появлению *диамагнитных* свойств материалов.

Диамагнетизм присущ всем без исключения веществам, но диамагнетиками являются лишь те вещества, у которых при отсутствии внешнего магнитного поля сумма всех магнитных моментов электронов равна нулю и единственным действием внешнего поля является наведение индуцированного магнитного момента атома, направленного против поля. Поэтому диамагнетики ослабляют внеш-

нее магнитное поле. К диамагнетикам относятся инертные газы, вещества в конденсированном состоянии — медь, висмут, серебро, золото, углерод, ртуть и другие.

Если вещества состоят из атомов, собственные магнитные моменты которых отличны от нуля, они относятся к магнитоупорядочивающимся. Существует несколько классов таких веществ — пара-, ферро-, антиферро- ферромагнетики. Во внешнем магнитном поле в таких веществах на атомы действует вращающий момент сил, ориентирующий их так, чтобы собственные магнитные моменты были направлены по направлению внешнего поля. В перечисленных материалах эффект упорядочения является более сильным, он перекрывает диамагнитный эффект, поэтому эти классы магнетиков усиливает внешнее магнитное поле.

Наиболее слабыми магнетиками являются парамагнетиками, например натрий, калий, алюминий, хром, марганец и другие.

Вещество, помещенное во внешнее магнитное поле, намагничивается. Степень намагничивания вещества принято характеризовать вектором намагничения  $\vec{J}$ .

Вектором намагничения называется физическая величина, численно равная суммарному магнитному моменту единицы объема вещества  $\vec{J} = \frac{\sum \vec{p}_m}{\Delta V}$ , где  $\sum \vec{p}_m$  — суммарный магнитный момент вещества в объеме  $\Delta V$ .

Вектор намагничения пропорционален напряженности магнитного поля  $\vec{H}$ , вызывающего намагничение  $\vec{J} = \chi \vec{H}$ , где  $\chi$  — магнитная восприимчивость вещества, численно равная величине вектора намагничения магнетика при напряженности магнитного поля равной единице.

Следовательно, магнитная восприимчивость парамагнетиков положительна ( $\chi > 0$ ), диамагнетиков — отрицательна ( $\chi < 0$ ).

Магнитное поле, создаваемое магнетиком, векторно складывается с внешним магнитным полем, и суммарное поле характеризуется индукцией магнитного поля  $\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{J}$  или  $\vec{B} = \mu_0 (1 + \chi) \vec{H} = \mu_0 \mu \vec{H}$ , где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнитная постоянная, магнитная проницаемость:  $\mu = 1 + \chi$ .

Каждый магнетик характеризуется магнитной проницаемостью  $\mu$ , показывающей, во сколько раз индукция поля  $\vec{B}$  в присутствии магнетика больше индукции  $\vec{B}_0$  магнитного поля в вакууме

$$\mu = \frac{B}{B_0} = 1 + \chi$$

Поэтому для диамагнетиков  $\mu < 1$ , а для парамагнетиков  $\mu > 1$ .

Однако как диамагнетики, так и парамагнетики очень незначительно изменяют внешнее магнитное поле и величина  $\mu$  для них очень мало отличается от единицы. Например, для воды  $\mu = 0,9999991$ , а для алюминия  $\mu = 1,000021$ .

Кроме парамагнетиков существуют родственные им материалы, обладающие целым рядом свойств, которые заставляют выделить их в особую группу, получившую название ферромагнетиков. Ферромагнетиками являются железо, никель, кобальт, гадолиний, а также некоторые сплавы.

К особым свойствам ферромагнетиков относятся:

- 1) высокая относительная магнитная проницаемость ( $\mu \gg 1$ ), сложным образом зависящая от напряженности магнитного поля  $H$ . Поскольку  $\mu = 1 + \chi$ , то магнитная восприимчивость  $\chi \gg 1$  и, кроме того, зависит от напряженности магнитного поля;
- 2) нелинейность зависимостей величин вектора намагничения  $J$  и индукции магнитного поля в ферромагнетике  $B$  от напряженности магнитного поля  $H$ .
- 3) наличие остаточной намагниченности после снятия внешнего магнитного поля и связанное с ней наличие гистерезиса в зависимостях  $J = J(H)$  и  $B = B(H)$ .
- 4) существование температуры, называемой точкой Кюри, при нагревании выше которой ферромагнетик теряет свои свойства и ведет себя как обычный парамагнетик.
- 5) явление магнитоstriction, заключающееся в деформации ферромагнетика при намагничении.

Типичная зависимость  $\mu(H)$  приведена на рисунке 13. В справочных таблицах обычно приводятся значения максимальной магнитной проницаемости.

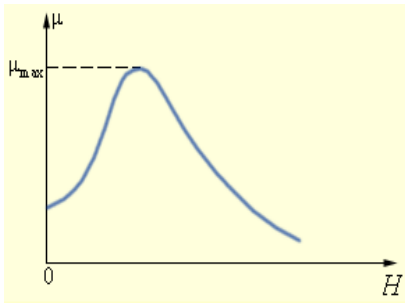


Рисунок 13 — Зависимость магнитной проницаемости ферромагнетика от напряженности магнитного поля

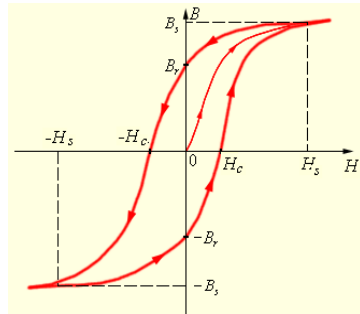


Рисунок 14 — Петля гистерезиса ферромагнетика

Непостоянство магнитной проницаемости приводит к сложной нелинейной зависимости индукции  $B$  магнитного поля в ферромагнетике от напряженности  $H$  внешнего магнитного поля.

Характерной особенностью процесса намагничивания ферромагнетиков является так называемый *гистерезис*, т. е. зависимость намагничивания от предыстории образца (рисунок 14). Кривая намагничивания  $B(H)$  ферромагнитного образца представляет собой петлю сложной формы, которая называется *петлей гистерезиса*

Из рисунка 15 видно, что при  $|H| > H_s$  наступает магнитное насыщение — намагниченность образца достигает максимального значения.

Если теперь уменьшать напряженность  $H$  внешнего поля и довести ее вновь до нулевого значения, то ферромагнетик сохранит остаточную намагниченность — поле внутри образца будет равно  $B_r$ . Остаточная намагниченность образцов позволяет создавать постоянные магниты. Если изменить знак напряженности внешнего поля и довести  $H$  до значения —  $H_c$ , которое принято называть *коэрцитивной силой*, индукция магнитного поля в объеме образца будет равна нулю, но при выключении внешнего магнитного поля ( $H = 0$ ) намагниченность останется. Для того чтобы полностью размагнитить образец, необходимо многократно совершить обход вдоль петли гистерезиса, как это указано стрелками на рисунке 15 и постепенно уменьшать амплитуду напряженности намагничивающего поля до нуля.

В связи с неоднозначностью зависимости  $B$  от  $H$  понятия магнитной проницаемости и магнитной восприимчивости ферромагнетиков применяются лишь к основной кривой намагничивания, соответствующей намагничению ферромагнетика, не подвергнувшегося ранее намагничению.

У магнитомягких материалов значения коэрцитивной силы  $H_c$  невелики — петля гистерезиса таких материалов достаточно «узкая», такие материалы применяются в системах трансформации энергии электрического поля, в устройствах записи и обработки информации. Материалы с большим значением коэрцитивной силы, то есть имеющие «широкую» петлю гистерезиса, обладают большим запасом магнитной энергии, требуют значительных затрат энергии для перемагничивания и называются магнитожесткими. Магнитомягкие материалы (сплавы ниодим–железо–бор, самарий–кобальт) используются для создания устойчивых к внешним воздействиям магнитных полей — в полюсных наконечниках электромагнитов, в подмагничивающих системах электрических двигателей, в качестве лабораторных источников магнитного поля.

Природа ферромагнетизма может быть до конца понята только на основе квантовых представлений. Качественно ферромагнетизм объясняется наличием собственных (спиновых) магнитных полей у электронов. В кристаллах ферромагнитных материалов возникают условия, при которых вследствие сильного взаимодействия спиновых магнитных полей соседних электронов, энергетически выгодной становится их параллельная ориентация. В результате такого взаимодействия внутри кристалла ферромагнетика возникают самопроизвольно намагниченные области размером порядка  $10^{-2}$ – $10^{-4}$  см. Эти области называются *доменами*. Каждый домен представляет из себя небольшой постоянный магнит (рисунок 15).

В отсутствие внешнего магнитного поля направления векторов индукции магнитных полей в различных доменах ориентированы в большом кристалле хаотически. Такой материал в среднем окажется ненамагниченным. При наложении внешнего магнитного поля  $H$  происходит смещение границ доменов так, что объем доменов, ориентированных по внешнему полю, увеличивается. С увеличением напряженности внешнего поля возрастает магнитная индукция намагниченного вещества. В очень сильном внешнем поле домены, в которых собственное магнитное поле совпадает по направлению с

внешним полем, поглощают все остальные домены, и наступает магнитное насыщение. Рисунок 15 может служить качественной иллюстрацией процесса намагничивания ферромагнитного образца.

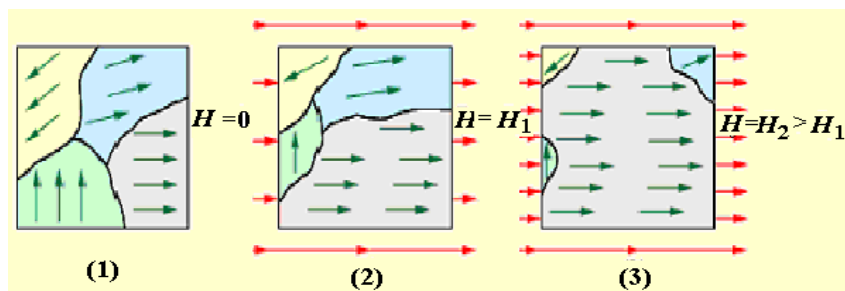


Рисунок 15 — Поведение доменов ферромагнетика во внешнем магнитном поле

Зависимость магнитной восприимчивости  $\chi$  (соответственно и магнитной проницаемости  $\mu$ ) от температуры для различных классов магнетиков отличается. Для диамагнетиков  $\chi$  от температуры не зависит. Для парамагнетиков имеет место зависимость, определяемая *законом Кюри*  $\chi = \frac{C}{T}$ , где  $C$  — постоянная Кюри, зависящая от свойств материала.

Для ферромагнетиков в достаточно большом интервале температур  $\chi$  почти не зависит от температуры, однако при температурах выше точки Кюри  $T_K$  тепловое движение разупорядочивает параллельную ориентацию спиновых магнитных моментов. Домены перестают существовать и ферромагнетик становится обычным парамагнетиком, магнитная восприимчивость которого в парамагнитной области подчиняется *закону Кюри-Вейсса*  $\chi = \frac{C}{T - T_K}$ , где  $C$  — постоянная, зависящая от рода вещества.

## Лабораторная работа 2.9 «Изучение зависимостей $B = B(H)$ и $\mu = \mu(H)$ ферромагнетиков»

Ознакомьтесь с конспектом лекций и учебником (Савельев, т.2, §§ 47–52).

**Цель работы** — выработать навыки проведения эксперимента, анализа экспериментальных данных и расчета погрешностей измерений.

### Задачи работы:

- 1) ознакомиться с магнитным полем в веществе, магнитным гистерезисом;
- 2) экспериментально изучить зависимость индукции магнитного поля в ферромагнетике от напряженности магнитного поля;
- 3) экспериментально изучить зависимость относительной магнитной проницаемости ферромагнетика от напряженности магнитного поля.

### Вопросы для допуска к лабораторной работе

1. Что такое магнитные свойства вещества?
2. На какие группы можно разбить вещества по их магнитным свойствам?
3. Что называется магнитной восприимчивостью вещества?
4. Что такое магнитная проницаемость вещества?
5. Как связаны магнитная восприимчивость и магнитная проницаемость вещества?

### Методика и порядок измерений

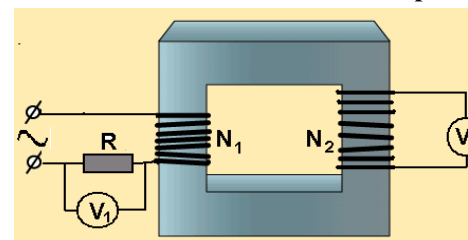


Рисунок 16

Методика измерений состоит в следующем (рисунок 16). Ток в намагничивающей катушке из  $N_1$  витков, намотанной на замкнутый сердечник исследуемого ферромагнетика, создает в сердечнике магнитное поле, напряженность которого

$H(t) = \frac{N_1 I(t)}{l}$ , где  $I(t) = I_m \cos \omega t$ ,  $l$  — длина сердечника по средней линии. Так как вольтметр  $V_1$  измеряет действующее значение напряжения  $U_1$  на сопротивлении  $R$ , то  $I_m = \frac{U_m}{R} = \frac{U_1 \sqrt{2}}{R}$ , и максимальное значение напряженности магнитного поля в сердечнике  $H_m = \frac{N_1 I_m}{l} = \frac{N_1 U_1 \sqrt{2}}{Rl}$ .

ЭДС индукции в измерительной катушке из  $N_2$  витков по закону Фарадея–Максвелла равна скорости изменения магнитного потока в ней  $\mathcal{E}(t) = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -N_2 S \frac{dB(t)}{dt}$ , где  $B(t) = B_m \cos \omega t$  — индукция магнитного поля в сердечнике из исследуемого ферромагнетика,  $S$  — площадь поперечного сечения сердечника. Учитывая зависимость  $B(t)$ , получаем  $\mathcal{E}(t) = N_2 S B_m \omega \sin \omega t$ . Максимальное значение ЭДС индукции  $\mathcal{E}(t) = N_2 S B_m \omega = N_2 S B_m 2\pi\nu$ . Из последнего выражения получаем, учитывая, что вольтметр  $V_2$  измеряет действующее значение ЭДС индукции  $\left( U_2 = \frac{\mathcal{E}_m}{\sqrt{2}} \right)$ ,  $B_m = \frac{U_2 \sqrt{2}}{N_2 S 2\pi\nu}$ .

Магнитная проницаемость для каждого значения тока в намагничивающей катушке  $\mu = \frac{B_m}{\mu_0 H_m}$ .

### Измерения

1. Ознакомьтесь с принципиальной схемой лабораторной установки, проверьте правильность ее сборки (рисунок 17.).
2. Получите у преподавателя задание для выполнения работы.
3. Изменяя напряжение  $U_1$  в соответствии с заданием, измерьте соответствующие напряжения  $U_2$  и занесите значения  $U_1$  и  $U_2$  в таблицу 3.

4. Для каждого измерения рассчитайте  $I_1 = \frac{U_1}{R}$ ,  $H_m = \frac{N_1 I_1 \sqrt{2}}{l}$ ,

$$B_m = \frac{U_2 \sqrt{2}}{N_2 S 2\pi\nu}, \quad \mu = \frac{B_m}{\mu_0 H_m}.$$

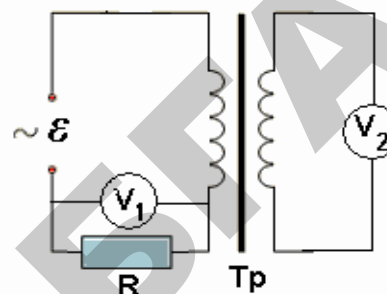


Рисунок 17 — Принципиальная схема и общий вид лабораторной установки:  $\mathcal{E}$  — регулируемый источник переменного тока;  $V_1, V_2$  — вольтметры;  $R$  — резистор,  $Tr$  — замкнутый сердечник из исследуемого ферромагнетика с намагничивающей и измерительной обмотками

Таблица 3

Данные схемы: $R =$ _____ Ом; $N_1 =$ _____; $N_2 =$ _____; $l =$ _____ м; $S =$ _____ м <sup>2</sup>						
№ измерения	$U_1$ , В	$I_1$ , А	$U_2$ , В	$H_m$ , А/м	$B_m$ , Тл	$\mu$
1.						
•						
•						
15.						

5. По экспериментальным данным постройте график зависимости  $B(H)$ ,  $\mu(H)$ .

6. Сформулируйте выводы по работе.

### Вопросы и задания для контроля

#### Уровень

1. Из чего складывается магнитный момент атома?
2. Чем объясняется явление диамагнетизма? Какие вещества относятся к диамагнетикам?
3. Как ведут себя диамагнетики во внешнем магнитном поле?
4. Какие вещества являются парамагнетиками?



## Лабораторная работа 2.10 «Изучение явления гистерезиса у ферромагнетиков»

Ознакомьтесь с конспектом лекций и учебником (Савельев, т.2, §§ 47–52).

**Цель работы** — выработать навыки проведения эксперимента, анализа экспериментальных данных и расчета погрешностей измерений.

### Задачи работы:

- 1) экспериментально изучить явление гистерезиса у ферромагнетиков;
- 2) экспериментально определить относительную магнитную проницаемость ферромагнетика.

### Вопросы для допуска к лабораторной работе

1. Какие отличительные свойства ферромагнетиков вы знаете?
2. Что такое предельная петля гистерезиса? Почему она является важной характеристикой ферромагнетика?
3. Что называется максимальной индукцией? От чего зависит величина максимальной индукции?
4. Что называется остаточной индукцией?
5. Что такое коэрцитивная сила?

### Методика и порядок измерений

На замкнутый сердечник из ферромагнитного материала намотаны две обмотки с числом витков  $N_1$  и  $N_2$  (рисунок 18). Ток, протекающий по намагничивающей обмотке, содержащей  $N_1$  витков, создает переменное магнитное поле. Напряженность этого поля  $H$  в каждый момент времени пропорциональна мгновенному значению тока  $I$  и определяется по формуле:

$$H = \frac{N_1 I}{l},$$

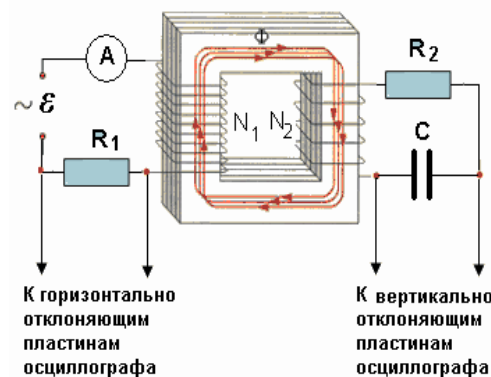


Рисунок 18

5. Как ведут себя парамагнетики во внешнем магнитном поле?

6. Дайте определение вектора намагничивания (намагниченности) магнетика.

7. Что такое магнитная восприимчивость вещества? Что показывает относительная магнитная проницаемость?

8. Какие значения имеет магнитная восприимчивость у диамагнетиков, парамагнетиков, ферромагнетиков?

9. Что характеризует индукция магнитного поля?

10. Какие отличительные свойства ферромагнетиков вы знаете?

11. Что называется остаточной индукцией?

12. Что такое коэрцитивная сила?

### II уровень

13. Чем объясняется явление ферромагнетизма? Как происходит намагничение ферромагнетика?

14. Почему и когда величина вектора намагничивания при увеличении напряженности внешнего магнитного поля достигает насыщения, магнитная восприимчивость падает до нуля? За счет чего продолжается незначительное возрастание индукции магнитного поля в ферромагнетике?

15. Что такое предельная петля гистерезиса? Почему она является важной характеристикой ферромагнетика?

16. Что такое «точка Кюри»? Чем объясняется ее существование?

17. Почему индукция магнитного поля в веществе отличается от индукции магнитного поля в вакууме?

### III уровень

18. Чем, с современной точки зрения, объясняется существование ферромагнитных материалов?

19. Какие сильномагнитные вещества кроме ферромагнетиков Вы знаете?

20. Какие магнетики называются антиферромагнетиками? Какую магнитную структуру имеют антиферромагнетики?



где  $l$  — длина сердечника. На пластины «X» осциллографа подается напряжение с сопротивления  $R_1$ , пропорциональное току в первичной обмотке. Максимальное отклонение луча от центрального положения в горизонтальном направлении  $l_{xm}$  пропорционально амплитудному значению тока, а значит и амплитудному значению напряженности магнитного поля  $H_m$ , которое определяется формулой

$$H_m = \frac{N_1 I_m}{l} = \frac{N_1}{l} \sqrt{2} I_1, \text{ где } I_1 \text{ — эффективное значение тока, измеряемое амперметром. Тогда масштаб горизонтальной оси } h \text{ рассчитывают как } h = \frac{H_m}{l_{xm}}.$$

Напряженность поля, соответствующую той или иной точке петли гистерезиса, можно рассчитать по формуле  $H = hl_x$ .

В измерительной обмотке, содержащей  $N_2$  витков, возникает электродвижущая сила индукции  $\mathcal{E} = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -N_2 S \frac{dB}{dT}$ , где  $S$  — сечение сердечника.

Так как во вторичной обмотке протекает ток  $I_2$ , то  $\mathcal{E}$  можно выразить как сумму падений напряжений на отдельных участках цепи:  $\mathcal{E} = I_2 R_2 + L \frac{dI_2}{dt} + U_c$ , где  $I_2 R_2$  — падение напряжения на сопротивлении  $R_2$ ,  $L \frac{dI_2}{dt}$  — ЭДС самоиндукции в измерительной обмотке,  $U_c$  — падение напряжения на конденсаторе  $C$ .

$$\text{Напряжение } U_c \text{ выражается формулой } U_c = \frac{1}{C} \int I_2 dt.$$

$$\text{Сопротивление } R_2 \text{ выбрано так, что } I_2 R_2 \gg L \frac{dI_2}{dt} + U_c.$$

$$\text{Тогда } \mathcal{E} \approx I_2 R_2, \text{ Откуда } I_2 = \frac{\mathcal{E}}{R_2} = -\frac{N_2 S}{R_2} \frac{dB}{dt} \text{ и напряжение}$$

$$U_c = \frac{1}{C} \int I_2 dt = \frac{1}{C} \int -\frac{N_2 S}{R_2} \frac{dB}{dt} dt = -\frac{N_2 S}{CR_2} \int dB = -\frac{N_2 SB}{CR_2}, \text{ т. е. } U_c \text{ пропорционально } B, \text{ и поэтому максимальное отклонение луча от цен-$$

трального положения в вертикальном направлении  $l_{ym}$  пропорционально максимальному значению индукции магнитного поля  $B_m$ , так как на пластины «Y» подается напряжение с конденсатора  $C$ .

$$\text{Для } B_m \text{ из последнего выражения получаем } B_m = \frac{U_{cm} CR_2}{N_2 S}.$$

Масштаб вертикальной оси:

$$b = \frac{B_m}{l_{ym}} = \frac{CR_2}{N_2 S} \cdot \frac{U_{cm}}{l_{ym}},$$

где  $\frac{U_{cm}}{l_{ym}} = k$  — масштабный коэффициент отклонения луча осциллографа по вертикальной оси. Этот коэффициент определяется по положению переключателя В/дел калиброванной шкалы осциллографа.

$$\text{Тогда } b = \frac{CR_2}{N_2 S} k. \text{ Индукцию магнитного поля, соответствующую}$$

любой точке петли гистерезиса, можно получить по формуле  $B = bl_y$ .

### Измерения

1. Ознакомьтесь с принципиальной схемой лабораторной установки, проверьте правильность ее сборки (рисунок 19).



Рисунок 19 — Общий вид лабораторной установки

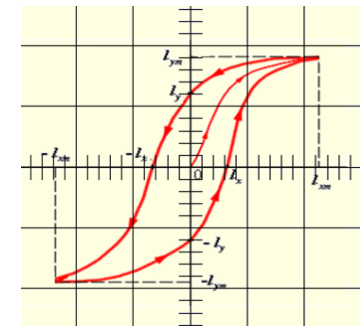


Рисунок 20 — Вид петли гистерезиса на экране осциллографа

2. Ознакомьтесь с правилами пользования осциллографом.  
 3. Включите осциллограф и источник питания в сеть.  
 4. Регулируя ток  $I_1$  (в пределах, указанных преподавателем) и изменяя положение переключателя В/дел осциллографа, получите хорошее изображение петли гистерезиса на экране осциллографа (рисунок 20). Запишите показания амперметра  $I_1$  и масштабный коэффициент отклонения луча осциллографа по вертикальной оси  $k$  (положение переключателя В/дел).

5. Зарисуйте петлю гистерезиса в масштабе 1:1 на миллиметровой бумаге. Занесите параметры петли гистерезиса  $l_x, l_{xm}, l_y, l_{ym}$  в таблицу 4.

6. Рассчитайте масштаб вертикальной оси по формуле  $b = \frac{CR_2}{N_2S} k$ .

7. Рассчитайте максимальные значения напряженности магнитного поля  $H_m = \frac{N_1}{l} \sqrt{2} I_1$  и индукции  $B_m = b l_{ym}$ , соответствующие вершинам петли гистерезиса.

8. Определите масштаб горизонтальной оси  $h = \frac{H_m}{l_{xm}}$ .

9. Рассчитайте коэрцитивную силу  $H_c = h l_x$  и остаточную индукцию  $B_r = b l_y$ .

10. Определите относительную магнитную проницаемость  $\mu = \frac{B_m}{\mu_0 H_m}$ .

Таблица 4 — Измеряемые величины

Данные схемы: $N_1 = \underline{\quad}$ ; $N_2 = \underline{\quad}$ ; $R_2 = \underline{\quad}$ Ом;					
$C = \underline{\quad}$ Ф; $l = \underline{\quad}$ м; $S = \underline{\quad}$ м <sup>2</sup>					
$I_1$ , А	$k$ , В/дел	$l_{xm}$ , дел	$l_{ym}$ , дел	$l_x$ , дел	$l_y$ , дел

Таблица 5 — Расчетные величины

$H_m$ , А/м	$h$ , $\frac{\text{А/м}}{\text{м}}$	$b$ , $\frac{\text{Тл}}{\text{м}}$	$B_m$ , Тл	$H_c$ , А/м	$B_r$ , Тл	$\mu$

11. Запишите ответ. Сформулируйте выводы.

### Вопросы и задания для контроля

#### I уровень

- Из чего складывается магнитный момент атома?
- Чем объясняется явление диамагнетизма? Какие вещества относятся к диамагнетикам?
- Какие вещества являются парамагнетиками? Чем объясняется их поведение во внешнем магнитном поле?
- Дайте определение вектора намагничивания (намагниченности) магнетика?
- Что такое магнитная восприимчивость вещества? Что показывает относительная магнитная проницаемость? Какие значения принимают эти величины у диамагнетиков, парамагнетиков, ферромагнетиков?
- Что характеризует индукция магнитного поля?

#### II уровень

- Чем объясняется явление ферромагнетизма? Как происходит намагничение ферромагнетика?
- Почему и когда величина вектора намагничивания при увеличении напряженности внешнего магнитного поля достигает насыщения, магнитная восприимчивость падает до нуля? За счет чего продолжается незначительное возрастание индукции магнитного поля в ферромагнетике?
- Что такое «точка Кюри»? Чем объясняется ее существование?
- Какое значение должна иметь величина коэрцитивной силы для постоянного магнита?
- Какое значение должна иметь величина остаточной индукции для постоянного магнита?

#### III уровень

- Что такое ферриты и почему они нашли широкое применение в радиотехнике?
- Можно ли создать постоянный магнит с индукцией 3 Тл?



4. Когда измеряемое напряжение уменьшится практически до 0 (минимального значения), выключите печь и записывайте показания вольтметра при охлаждении в обратном порядке.

5. По полученным данным, постройте графики зависимости напряжения от температуры при нагревании и охлаждении.

6. Определите точку Кюри по каждой кривой графической зависимости  $U = f(t)$ .

7. Запишите ответ. Сформулируйте выводы по работе.

### Вопросы и задания для контроля

#### I уровень

1. Чем объясняется явление диамагнетизма? Какие вещества относятся к диамагнетикам?

2. Какие вещества являются парамагнетиками? Чем объясняется их поведение во внешнем магнитном поле?

3. Дайте определение вектора намагничивания (намагниченности) магнетика?

4. Что такое магнитная восприимчивость вещества?

5. Какие значения магнитной восприимчивости имеют диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики?

6. Что показывает относительная магнитная проницаемость?

7. Что характеризует индукция магнитного поля?

8. Как происходит намагничение ферромагнетика?

9. Какие ферромагнетики Вы знаете?

#### II уровень

10. Почему и когда величина вектора намагничивания при увеличении напряженности внешнего магнитного поля достигает насыщения, магнитная восприимчивость падает до нуля? За счет чего продолжается незначительное возрастание индукции магнитного поля в ферромагнетике?

11. Что такое «точка Кюри»? Чем объясняется ее существование?

12. Чем объясняется явление ферромагнетизма?

#### III уровень

13. Будет ли постоянный магнит притягивать железные опилки, если его нагреть выше температуры Кюри и медленно охладить?

## 3. Электромагнитная индукция

### Краткая теория

Явление *электромагнитной индукции* было открыто выдающимся английским физиком М. Фарадеем в 1831 г. Это явление заключается в возникновении электрического тока в замкнутом проводящем контуре при изменении во времени *магнитного потока*, пронизывающего контур.

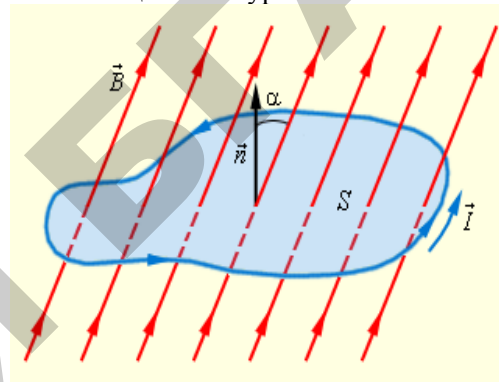


Рисунок 22 — К определению магнитного потока

Магнитным потоком  $\Phi$  через площадь  $S$  контура называют величину  $\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha$ , где  $B$  — модуль вектора магнитной индукции,  $\alpha$  — угол между вектором  $\vec{B}$  и нормалью  $\vec{n}$  к плоскости контура (рисунок 22). Направление нормали  $\vec{n}$  и выбранное положительное направление  $\vec{l}$  обхода контура связаны правилом правого буравчика.

Определение магнитного потока нетрудно обобщить на случай неоднородного магнитного поля и неплоского контура. Единица магнитного потока в системе СИ называется *вебером* (Вб). Магнитный поток, равный 1 Вб, создается магнитным полем с индукцией 1 Тл, пронизывающим по направлению нормали плоский контур площадью 1 м<sup>2</sup>:  $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2$ .

Фарадей экспериментально установил, что при изменении магнитного потока в проводящем контуре возникает ЭДС индукции  $\mathcal{E}_i$ , равная скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром, взятой со знаком минус:  $\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}$ .

Опыт показывает, что индукционный ток, возбуждаемый в замкнутом контуре при изменении магнитного потока, всегда направлен так, что создаваемое им магнитное поле препятствует изменению

магнитного потока, вызывающего индукционный ток. Это утверждение называется *правилом Ленца* (1833).

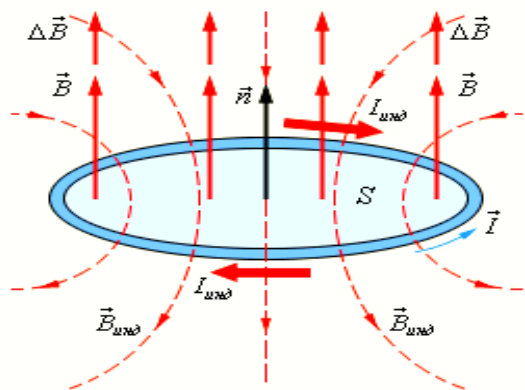


Рисунок 23

Рисунок 23 иллюстрирует правило Ленца на примере неподвижного проводящего контура, который находится в однородном магнитном поле, модуль индукции которого увеличивается во времени. Правило Ленца отражает следующий экспериментальный факт:  $\mathcal{E}_i$  и  $\frac{d\Phi}{dt}$  всегда имеют противоположные знаки (знак «минус» в формуле Фарадея). Правило Ленца имеет глубокий физический смысл — оно выражает закон сохранения энергии.

Изменение магнитного потока, пронизывающего замкнутый контур, может происходить по двум причинам.

1. Магнитный поток изменяется вследствие перемещения контура или его частей в постоянном во времени магнитном поле, т. е., когда проводники, а вместе с ними и свободные носители заряда, движутся в магнитном поле. Возникновение ЭДС индукции объясняется действием силы Лоренца на свободные заряды в движущихся проводниках. Сила Лоренца играет в этом случае роль сторонней силы.

Рассмотрим в качестве примера возникновение ЭДС индукции в прямоугольном контуре, помещенном в однородное магнитное поле

$\vec{B}$ , перпендикулярное плоскости контура. Пусть одна из сторон контура длиной  $l$  скользит со скоростью  $\vec{v}$  по двум другим сторонам (см. рисунок 24).

На свободные заряды на этом участке контура действует сила Лоренца. Одна из составляющих этой силы, связанная с переносной скоростью  $\vec{v}$  зарядов, направлена вдоль проводника. Эта составляющая (рисунок 24) играет роль сторонней силы. Ее модуль равен  $F_{Л} = evB$ .

Работа силы  $F_{Л}$  на пути  $l$  равна  $A = F_{Л} \cdot l = evBl$ .

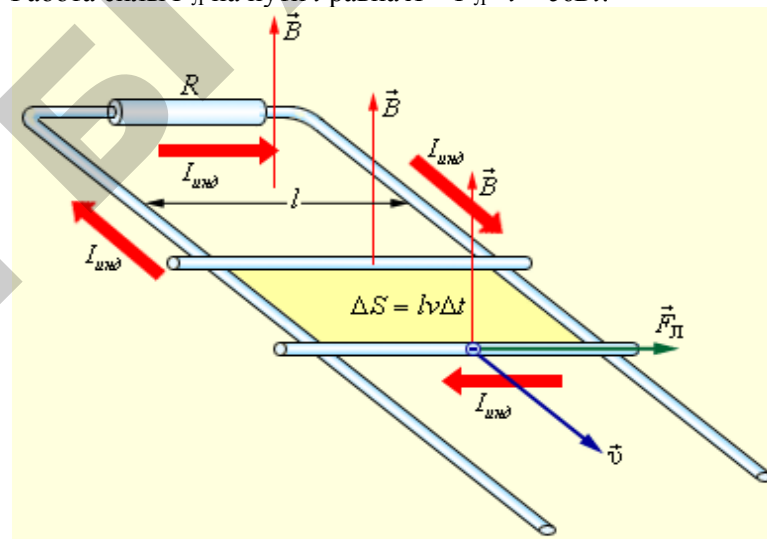


Рисунок 24

По определению ЭДС  $\mathcal{E}_i = \frac{A}{e} = vBl$ .

В других неподвижных частях контура сторонняя сила равна нулю. Соотношению для  $\mathcal{E}_i$  можно придать привычный вид. За время  $\Delta t$  площадь контура изменяется на  $\Delta S = lv\Delta t$ . Изменение магнитного потока за это время равно  $\Delta\Phi = Bv\Delta t$ . Следовательно,  $|\mathcal{E}_i| = \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right|$

Для того чтобы установить знак в формуле, связывающей  $\mathcal{E}_i$  и  $\left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right|$ , нужно выбрать согласованные между собой по правилу правого буравчика направление нормали  $\vec{n}$  и положительное направление обхода контура  $\vec{l}$ , как это показано на предыдущих рисунках. Выбрав правильное направление, можно легко прийти к формуле Фарадея.

Если сопротивление всей цепи равно  $R$ , то по ней будет протекать индукционный ток, равный  $I_i = \frac{\mathcal{E}_i}{R}$ . За время  $\Delta t$  на сопротивлении  $R$  выделится джоулево тепло  $\Delta Q = I_i^2 R \Delta t = \frac{\mathcal{E}_i^2}{R} \Delta t$ .

Следует выяснить, откуда берется эта энергия, если сила Лоренца работы не совершает. При протекании индукционного тока по проводнику, находящемуся в магнитном поле, на свободные заряды действует еще одна составляющая силы Лоренца, связанная с относительной скоростью движения зарядов вдоль проводника. Эта составляющая ответственна за появление силы Ампера  $\vec{F}_A$ . Для случая, изображенного на рисунке 24, модуль силы Ампера равен  $F_A = IBl$ . Сила Ампера направлена навстречу движению проводника; поэтому она совершает отрицательную механическую работу. За время  $\Delta t$  эта работа  $A_{\text{мех}}$  равна  $A_{\text{мех}} = -F \cdot v \Delta t = -IBlv \Delta t = -\frac{v^2 B^2 l^2}{R} \Delta t$ .

Движущийся в магнитном поле проводник, по которому протекает индукционный ток, испытывает *магнитное торможение*. Полная работа силы Лоренца равна нулю. Джоулево тепло в контуре выделяется либо за счет работы внешней силы, которая поддерживает скорость проводника неизменной, либо за счет уменьшения кинетической энергии проводника.

2. Магнитный поток изменяется вследствие изменения во времени магнитного поля при неподвижном контуре. В этом случае возникновение ЭДС индукции уже нельзя объяснить действием силы Лоренца. Электроны в неподвижном проводнике могут приводиться в движение только электрическим полем. Это электрическое поле порождается изменяющимся во времени магнитным полем. Работа

этого поля при перемещении единичного положительного заряда по замкнутому контуру равна ЭДС индукции в неподвижном проводнике. Следовательно, электрическое поле, порожденное изменяющимся магнитным полем, не является потенциальным. Его называют *вихревым электрическим полем*. Циркуляция вектора напряженности  $\vec{E}_B$  этого поля по любому контуру  $l$  проводника представляет собой ЭДС электромагнитной индукции:  $\mathcal{E}_i = \oint_l \vec{E}_B \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt}$ .

Представление о вихревом электрическом поле было введено в физику великим английским физиком Дж. Максвеллом (1861).

Явление электромагнитной индукции в неподвижных проводниках, возникающее при изменении окружающего магнитного поля, также описывается формулой Фарадея. Таким образом, явления индукции в движущихся и неподвижных проводниках протекают одинаково, но физическая причина возникновения индукционного тока оказывается в этих двух случаях различной: в случае движущихся проводников ЭДС индукции обусловлена силой Лоренца; в случае неподвижных проводников ЭДС индукции является следствием действия на свободные заряды вихревого электрического поля, возникающего при изменении магнитного поля.

*Самоиндукция* является важным частным случаем электромагнитной индукции, когда изменяющийся магнитный поток, вызывающий ЭДС индукции, создается током в самом контуре. Если ток в рассматриваемом контуре по каким-то причинам изменяется, то изменяется и магнитное поле этого тока, а следовательно, и собственный магнитный поток, пронизывающий контур. В контуре возникает ЭДС самоиндукции, которая согласно правилу Ленца препятствует изменению тока в контуре.

Собственный магнитный поток  $\Phi$ , пронизывающий контур или катушку с током, пропорционален силе тока  $I$ :  $\Phi = LI$ .

Коэффициент пропорциональности  $L$  в этой формуле называется *коэффициентом самоиндукции* или *индуктивностью* катушки. Единица индуктивности в СИ называется *генри* (Гн). Индуктивность контура или катушки равна 1 Гн, если при силе постоянного тока 1 А собственный поток равен 1 Вб:  $1 \text{ Гн} = 1 \text{ Вб} / 1 \text{ А}$ .



В качестве примера рассчитаем индуктивность длинного соленоида, имеющего  $N$  витков, площадь сечения  $S$  и длину  $l$ . Магнитное поле соленоида определяется формулой  $B = \mu_0 In$ , где  $I$  — ток в соленоиде,  $n = N/l$  — число витков на единицу длины соленоида.

Магнитный поток, пронизывающий все  $N$  витков соленоида, равен  $\Phi = B \cdot S \cdot N = \mu_0 n^2 S l I$ .

Следовательно, индуктивность соленоида равна  $L = \mu_0 n^2 S l = \mu_0 n^2 V$ , где  $V = S l$  — объем соленоида, в котором сосредоточено магнитное поле. Полученный результат не учитывает краевых эффектов, поэтому он приближенно справедлив только для достаточно длинных катушек. Если соленоид заполнен веществом с магнитной проницаемостью  $\mu$ , то при заданном токе  $I$  индукция магнитного поля возрастает по модулю в  $\mu$  раз, поэтому индуктивность катушки с сердечником также увеличивается в  $\mu$  раз:  $L_\mu = \mu L = \mu_0 \mu n^2 V$ .

ЭДС самоиндукции, возникающая в катушке с постоянным значением индуктивности, согласно формуле Фарадея равна:

$$\mathcal{E}_i = \mathcal{E}_S = -\frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{dI}{dt}.$$

ЭДС самоиндукции прямо пропорциональна индуктивности катушки и скорости изменения силы тока в ней.

## Лабораторная работа 2.12

### «Определение индуктивности соленоида методом Жубера»

Ознакомьтесь с конспектом лекций и учебником (Савельев, т.2, §§ 53–58).

**Цель работы** — выработать навыки проведения эксперимента, анализа экспериментальных данных и расчета погрешностей измерений.

#### Задачи работы:

- 1) ознакомиться с явлениями электромагнитной индукции, самоиндукции;
- 2) экспериментально подтвердить закономерности для магнитного поля в соленоиде;
- 3) экспериментально определить индуктивность соленоида.

#### Вопросы для допуска к лабораторной работе

1. Кем было открыто явление электромагнитной индукции? Расскажите об опытах, в которых оно наблюдалось.
2. Дайте определение магнитного потока.
3. По каким причинам может изменяться магнитный поток?
4. Сформулируйте и запишите закон электромагнитной индукции.

#### Методика и порядок измерений

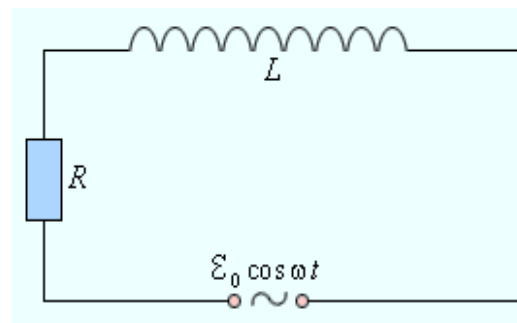


Рисунок 25

Рассмотрим цепь переменного тока с индуктивностью  $L$  и сопротивлением  $R$ , в которую включен источник тока, электродвижущая сила которого изменяется по периодическому закону:

$$\mathcal{E}(t) = \mathcal{E}_0 \cos \omega t, \quad \text{где}$$

$\mathcal{E}_0$  — амплитуда,  $\omega$  — круговая частота (рисунок 25).

Предполагается, что для электрической цепи, изображенной на рисунке, выполнено условие квазистационарности. Поэтому закон Ома можно записать для мгновенных значений токов и напряжений:

$$RI + L \frac{dI}{dt} = \mathcal{E}_0 \cos \omega t.$$

Величина  $L \frac{dI}{dt}$  — это перенесенная с изменением знака из правой части уравнения в левую ЭДС самоиндукции катушки. Эту величину принято называть *напряжением на катушке индуктивности*.

Уравнение вынужденных колебаний можно записать в виде  $U_R + U_L = \mathcal{E}(t) = \mathcal{E}_0 \cos \omega t$ , где  $U_R = U_R(t)$ ,  $U_L = U_L(t)$  — мгновенные значения напряжений на резисторе и катушке соответственно. Амплитуды этих напряжений будем обозначать буквами  $U_{R \max}$  и  $U_{L \max}$ . При установившихся вынужденных колебаниях все напряжения изменяются с частотой  $\omega$  внешнего источника переменного тока. Для наглядного решения уравнения вынужденных колебаний можно использовать *метод векторных диаграмм*.

Для того чтобы построить векторную диаграмму напряжений и токов при вынужденных колебаниях в электрической цепи, нужно знать соотношения между амплитудами токов и напряжений и фазовый сдвиг между ними для всех участков цепи.

Рассмотрим по отдельности случаи подключения внешнего источника переменного тока к резистору с сопротивлением  $R$  и к катушке индуктивности  $L$ . В обоих случаях напряжения на резисторе и катушке равны ЭДС источника переменного тока.

Резистор в цепи переменного тока:

$$I_R R = U_R = \mathcal{E}_0 \cos \omega t; \quad I_R = \frac{\mathcal{E}_0}{R} \cos \omega t = I_{R \max} \cos \omega t.$$

Полученное соотношение показывает, что фазовый сдвиг между током и напряжением на резисторе равен нулю.

Катушка индуктивности в цепи переменного тока:

$$U_L = L \frac{dI_L}{dt} = \mathcal{E}_0 \cos \omega t;$$

$$I_L = \int \frac{\mathcal{E}_0}{L} \cos \omega t dt = \frac{\mathcal{E}_0}{\omega L} \sin \omega t = \frac{\mathcal{E}_0}{\omega L} \cos \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right) = I_{L \max} \cos \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right).$$

Соотношение между амплитудами тока  $I_{L \max}$  и напряжения  $\mathcal{E}_0$ :

$$\omega L I_{L \max} = \mathcal{E}_0.$$

Ток отстает по фазе от напряжения на угол  $\frac{\pi}{2}$ .

Показать, амплитудные и фазовые соотношения для тока и падения напряжения на активной и индуктивной нагрузке можно следующим образом.

1. Рассмотрим чисто активную нагрузку. Представим ЭДС источника в виде экспоненциальной функции, используя формулы Эйлера  $\mathcal{E}(t) = \mathcal{E}_0 \cos \omega t = \mathcal{E}_0 e^{i\omega t}$ , здесь  $i$  — мнимая единица,  $i^2 = -1$ . Импеданс активной нагрузки равен сопротивлению постоянному току  $Z_R = R$ . Применяя закон Ома к цепи переменного тока  $I = \frac{\mathcal{E}}{Z_R}$

убеждаемся, что  $I_R = \frac{\mathcal{E}_0 e^{i\omega t}}{R} = I_{R \max} e^{i\omega t}$ ,  $I_{R \max} = \frac{\mathcal{E}_0}{R}$ . То есть ток через активное сопротивление изменяется по закону косинуса как и ЭДС источника.

2. Источник ЭДС нагружен на индуктивность. Тогда импеданс цепи является функцией, зависящей от частоты:  $Z_L = i\omega L$ . Применяя закон Ома определим ток через индуктивность.  $I = \frac{\mathcal{E}}{Z_L}$ . Или

$$I = \frac{\mathcal{E}_0 e^{i\omega t}}{i\omega L} = \frac{\mathcal{E}_0}{\omega L} = \frac{\mathcal{E}_0}{\omega L} e^{i\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)} = \frac{\mathcal{E}_0}{\omega L} \cos \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right).$$

Это выражение получено в соответствии с формулой Эйлера

$$\frac{1}{i} = -i = e^{-i\frac{\pi}{2}}, \quad e^{-i\frac{\pi}{2}} = \cos \frac{\pi}{2} - i \sin \frac{\pi}{2}.$$

Таким образом, ток в индуктивной нагрузке отстает по фазе от ЭДС (напряжения).

3. Для цепи, содержащей последовательно соединенные активную нагрузку и индуктивность импеданс  $Z$ , определим как сумму импедансов  $Z = Z_R + Z_L = R + i\omega L$ . Ток в цепи в соответствии с

законом Ома равен  $I = \frac{\varepsilon}{Z}$ . Подставляя выражение для импеданса  $Z$

в выражение для закона Ома получим  $I = \frac{\varepsilon}{Z} = \frac{\varepsilon_0 e^{i\omega t}}{R + i\omega L}$ . Преобразуем комплексный знаменатель:

$$R + i\omega L = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} e^{i \arctg \frac{\omega L}{R}}$$

Соответственно выражение для тока обретает вид

$$I = \frac{\varepsilon_0 e^{i\omega t}}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2} e^{i \arctg \frac{\omega L}{R}}} = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} e^{i(\omega t - \arctg \frac{\omega L}{R})}$$

Из этой формы записи видно, что ток в цепи отстает по фазе от ЭДС генератора

$$I = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} e^{i(\omega t - \arctg \frac{\omega L}{R})} = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \cos(\omega t - \varphi) = I_0 \cos(\omega t - \varphi);$$

$$I_0 = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}; \quad \text{tg } \varphi = \frac{\omega L}{R}$$

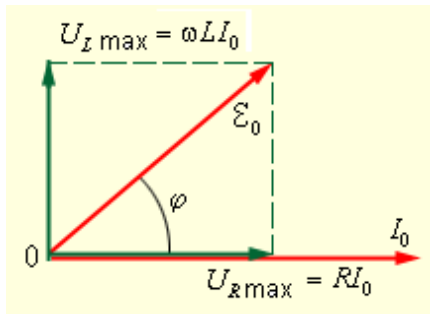


Рисунок 26

Теперь можно построить векторную диаграмму для рассматриваемой цепи, в которой происходят вынужденные колебания на частоте  $\omega$  (рисунок 26). Ток, протекающий через последовательно соединенные участки цепи, один и тот же  $I_{L \max} = I_{R \max} = I_0$ . Векторную диаграмму удобно строить относительно вектора ЭДС внешнего источника, которая опережает колебания тока в цепи на  $\varphi$ .

На рисунке 26 вектор амплитуды ЭДС вращается против часовой стрелки. Мгновенное значение ЭДС равно проекции вектора амплитуды на ось  $X$ . Падение напряжения

на активном сопротивлении равно  $U_{R \max} = I_0 R$ , падение напряжения на индуктивности

$$U_{L \max} = IZ_L = I_0 e^{i(\omega t - \arctg \frac{\omega L}{R})} i\omega L = I_0 \omega L e^{i(\omega t - \arctg \frac{\omega L}{R} + \frac{\pi}{2})}$$

Полученное выражение показывает, что падение напряжения на индуктивности составляет прямой угол с линией тока и падением напряжения на активном сопротивлении.

Из рисунка видно, что  $\varepsilon_0^2 = U_{R \max}^2 + U_{L \max}^2$ .

Величину  $X_L = \omega L$ , характеризующую влияние индуктивности и имеющую размерность сопротивления, называют индуктивным сопротивлением.

Величину  $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$  называют полным сопротивлением (импедансом) цепи переменного тока.

На использовании последней формулы основан метод Жубера для определения индуктивности соленоида. Полное сопротивление  $Z$  соленоида определяют, включив его в цепь переменного тока, а активное  $R$  — включив тот же соленоид в цепь постоянного тока. Индуктивность  $L$  соленоида рассчитывают по формуле  $L = \frac{1}{\omega} \sqrt{Z^2 - R^2}$ .

### Измерения

1. Ознакомьтесь с принципиальной схемой лабораторной установки, проверьте правильность ее сборки (рисунок 27).

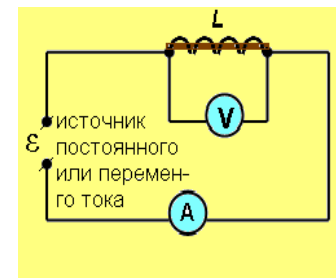


Рисунок 27 — Принципиальная схема и общий вид лабораторной установки:

$\varepsilon$  — регулируемый источник питания;  $A$  — амперметр;  $V$  — вольтметр;  $L$  — соленоид сдвигающимся сердечником

2. Выдвиньте сердечник из соленоида и подключите схему к регулируемому источнику постоянного тока.

3. Сделайте не менее пяти измерений силы тока  $I$  и соответствующего напряжения  $U$ . Изменение тока осуществляйте с помощью регулируемого источника тока. Значения токов задает преподаватель. Данные измерений запишите в таблицу 7.

4. По закону Ома  $R = \frac{U}{I}$  вычислите для каждого измерения ак-

тивное сопротивление соленоида  $R$ , среднее значение сопротивления  $R_{cp}$  и среднюю абсолютную погрешность  $\Delta R_{cp}$ .

Таблица 7

№ опыта	$I, A$	$U, B$	$R, Ом$	$\Delta R, Ом$
1.				
2.				
3.				
4.				
5.				
Среднее значение				

6. Отключите электрическую цепь от источника постоянного тока и подключите ее к регулируемому источнику переменного тока.

7. Вдвиньте в соленоид сердечник на половину его длины.

8. Сделайте не менее пяти измерений силы тока  $I$  и соответствующего напряжения  $U$ . Изменение тока осуществляйте с помощью регулируемого источника тока. Значения токов задает преподаватель. Данные измерений запишите в таблицу 8.

9. Полностью введите сердечник в соленоид. Повторите измерения по п. 8.

10. По закону Ома  $Z = \frac{U}{I}$  вычислите для каждого измерения

полное сопротивление соленоида  $Z$ , среднее значение сопротивления  $Z_{cp}$  и среднюю абсолютную погрешность  $\Delta Z_{cp}$ .

11. По средним значениям активного и полного сопротивлений соленоида вычислите по формуле  $L = \frac{1}{\omega} \sqrt{Z^2 - R^2}$  его индуктив-

ность:

а) с вдвинутым в соленоид сердечником на половину его длины;

б) с полностью вдвинутым в соленоид сердечником.

Таблица 8

	№ опыта	$I, A$	$U, B$	$Z, Ом$	$\Delta Z, Ом$	$L, Гн$
Сердечник вдвинут наполовину	1.					
	2.					
	3.					
	4.					
	5.					
	Среднее значение					
Сердечник вдвинут полностью	1.					
	2.					
	3.					
	4.					
	5.					
	Среднее значение					

11. Запишите ответ. Сформулируйте выводы.

## Вопросы и задания для контроля

### I уровень

1. Сформулируйте и проиллюстрируйте правило Ленца.
2. Дайте определение индуктивности контура.
3. В каких единицах измеряется индуктивность?
4. От чего зависит величина индуктивности контура?
5. В чем заключается явление самоиндукции?
6. Как определить ЭДС самоиндукции при неизменной индуктивности контура?

### II уровень

7. Как влияет самоиндукция на скорость изменения тока в контуре? Связано ли это влияние с правилом Ленца?
8. За счет чего индукционный ток может совершать работу?
9. В каком случае в пространстве возникает вихревое электрическое поле? В чем состоит его отличие от электростатического поля?
10. Чем обусловлено возникновение индукционного тока в движущихся проводниках, когда магнитная индукция остается неизменной?

### III уровень

11. Применяя правило Ленца, сравните модуль ускорения постоянного прямого магнита, падающего сквозь медное кольцо, с величиной  $g$  в начале и в конце пролета кольца.

## 4. Электромагнитные колебания в цепи квазистационарного тока

### Краткая теория

В электрических цепях, так же как и в механических системах (например, груз на пружине или маятник) могут возникать свободные колебания. Простейшей электрической системой, способной совершать свободные колебания, является последовательный  $RLC$ -контур (см. рисунок 28).

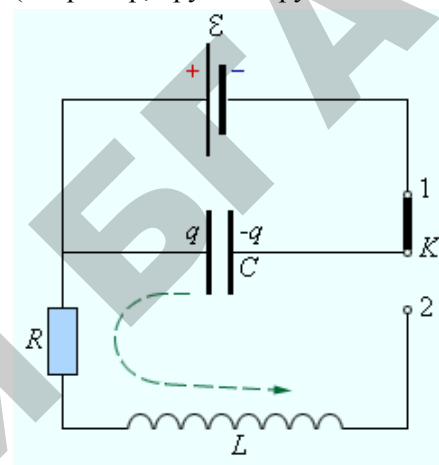


Рисунок 28

Когда ключ  $K$  находится в положении 1, конденсатор заряжается до напряжения  $\mathcal{E}$ . После переключения ключа в положение 2 начинается процесс разрядки конденсатора через резистор  $R$  и катушку индуктивности  $L$ . При определенных условиях этот процесс может иметь колебательный характер.

Закон Ома для замкнутой  $RLC$ -цепи, не содержащей внешнего источника тока, записывается в соответствии с правилом Кирхгофа — сумма падений напряжения в замкнутой цепи равна нулю

$$IR + U_C + L \frac{dI}{dt} = 0,$$

где  $U_C = \frac{q}{C}$  — напряжение на конденсаторе,  $q$  — заряд конденсатора,

$L \frac{dI}{dt}$  — падение напряжения на катушке индуктивности,

$I = \frac{dq}{dt}$  — ток в цепи. Уравнение, описывающее свободные колебания в  $RLC$ -контуре, может быть приведено к следующему виду, ес-

ли в качестве переменной величины выбрать заряд конденсатора  $q(t)$ :

$$\ddot{q} + \frac{R}{L}\dot{q} + \frac{1}{LC}q = 0.$$

Рассмотрим сначала случай, когда в контуре нет потерь электромагнитной энергии ( $R = 0$ ). Тогда

$$\ddot{q} + \omega_0^2 q = 0. \quad (*)$$

Здесь принято обозначение:  $\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$ . Уравнение (\*) описывает

свободные колебания в  $LC$ -контуре в отсутствие затухания. Оно в точности совпадает по виду с уравнением свободных колебаний груза на пружине в отсутствие сил трения. В отсутствие затухания свободные колебания в электрическом контуре являются гармоническими, то есть происходят по закону  $q(t) = q_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ .

Параметры  $L$  и  $C$  колебательного контура определяют только собственную частоту свободных колебаний  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ .

Амплитуда  $q_0$  и начальная фаза  $\varphi_0$  определяются начальными условиями, то есть тем способом, с помощью которого система была выведена из состояния равновесия. В частности, для процесса колебаний, который начнется в контуре на рисунке после переброса ключа  $K$  в положение 2,  $q_0 = C\varepsilon$ ,  $\varphi_0 = 0$ .

При свободных колебаниях происходит периодическое превращение электрической энергии  $W_э$ , запасенной в конденсаторе, в магнитную энергию  $W_м$  катушки и наоборот. Если в колебательном контуре нет потерь энергии, то полная электромагнитная энергия системы остается неизменной:  $W = W_э + W_м = \frac{q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2} = \text{const}$ .

Все реальные контуры содержат электрическое сопротивление  $R$ . Процесс свободных колебаний в таком контуре уже не подчиняется гармоническому закону. За каждый период колебаний часть электромагнитной энергии, запасенной в контуре, превращается в джоулево тепло, и колебания становятся затухающими.

Затухающие колебания в электрическом контуре аналогичны затухающим колебаниям груза на пружине при наличии вязкого трения, когда сила трения изменяется прямо пропорционально скорости тела:  $F_{тр} = -r v$ . Коэффициент  $r$  в этой формуле аналогичен сопротивлению  $R$  в электрическом контуре. Уравнение свободных колебаний в контуре при наличии затухания имеет вид

$$\ddot{q} + 2\delta\dot{q} + \omega_0^2 q = 0. \quad (**)$$

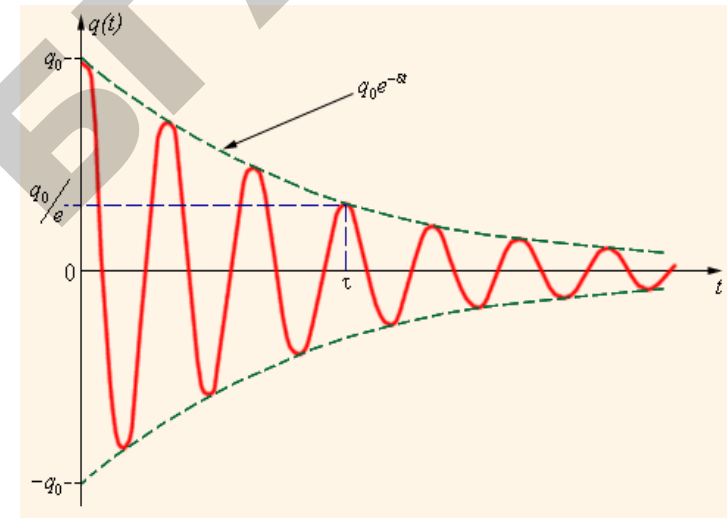


Рисунок 29

Физическая величина  $\delta = \frac{R}{2L}$  называется коэффициентом затухания. Решением этого дифференциального уравнения при  $\delta < \omega_0$  является функция:

$$q(t) = q_0 e^{-\delta t} (\cos \omega t + \varphi_0),$$

где  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ .

Таким образом частота затухающих колебаний  $\omega$  меньше собственной частоты  $\omega_0$ . Функция  $q(t)$  содержит множитель  $\exp(-\delta t)$ , описывающий затухание колебаний — амплитуда колебаний со вре-



менем изменяется по экспоненциальному закону. График функции  $q(t)$  представлен на рисунке 29. Скорость затухания зависит от электрического сопротивления  $R$  контура. Интервал времени  $\tau = \frac{1}{\delta}$ , в течение которого амплитуда колебаний уменьшается в  $e \approx 2,7$  раза, называется *временем затухания*. За это время система совершит  $N_e = \frac{\tau}{T}$  колебаний.

Для характеристики колебательной системы обычно используется *логарифмический декремент затухания*  $\lambda$  — логарифм отношения значений амплитуд колеблющейся величины, соответствующих моментам времени, отличающимся на период, т. е.

$$\lambda = \ln \frac{q_0 e^{-\delta t}}{q_0 e^{-\delta(t+T)}} = \delta T = \frac{1}{N_e}.$$

Колебательные системы принято характеризовать величиной  $Q = \frac{\pi}{\lambda} = \pi N_e$ , называемая *добротностью*. Добротность  $Q$  любой колебательной системы, способной совершать свободные колебания, может быть дано энергетическое определение:

$$Q = 2\pi \frac{W}{\Delta W} = 2\pi \frac{\text{Запас энергии в колебательной системе}}{\text{Потеря энергии за 1 период}}.$$

Для  $RLC$ -контура добротность  $Q$  выражается формулой:

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Добротность электрических контуров, применяемых в радиотехнике, обычно порядка нескольких десятков и даже сотен.

Как отмечалось, собственная частота  $\omega$  свободных колебаний в контуре с не очень высокой добротностью несколько меньше собственной частоты  $\omega_0$  идеального контура с теми же значениями  $L$  и  $C$ . Но при  $Q \geq 5 \div 10$  этим различием можно пренебречь.

## Лабораторная работа 2.13 «Исследование затухающих колебаний в колебательном контуре»

Ознакомьтесь с конспектом лекций и учебником (Савельев, т.2, §§ 63–71).

**Цель работы** — выработать навыки проведения эксперимента, анализа экспериментальных данных и расчета погрешностей измерений.

### Задачи работы:

- 1) ознакомиться с электромагнитными колебаниями и их характеристиками;
- 2) экспериментально изучить характеристики затухающих электромагнитных колебаний;
- 3) экспериментально определить добротность колебательного контура.

### Вопросы для допуска к лабораторной работе

1. Что такое колебательный контур? Как можно вызвать в нем свободные колебания?
2. Какие колебания называются гармоническими?
3. Запишите уравнение незатухающих гармонических колебаний.
4. Запишите уравнение затухающих гармонических колебаний.
5. Что называется коэффициентом затухания?
6. От чего зависит коэффициент затухания  $RLC$  – колебательного контура?

### Методика и порядок измерений

Для возбуждения колебаний в последовательном колебательном контуре служит генератор импульсов, который 50 раз в секунду вырабатывает положительные импульсы напряжением длительностью  $\approx 10^{-3}$  с. Конденсатор контура получает с каждым импульсом некоторый начальный заряд, а в промежутках между импульсами в контуре совершаются свободные колебания, наблюдаемые на экране осциллографа.

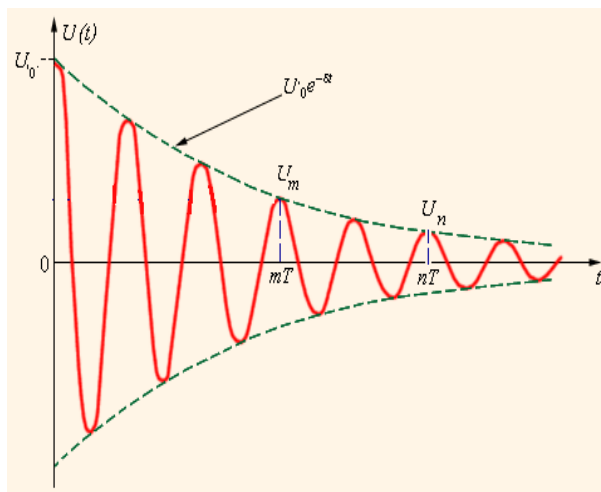


Рисунок 30 — График зависимости напряжения на конденсаторе в последовательном колебательном контуре от времени

Напряжение на конденсаторе в последовательном колебательном контуре изменяется по закону

$$U(t) = \frac{q(t)}{C} = \frac{q_0}{C} e^{-\delta t} (\cos \omega t + \varphi_0) = U_0 e^{-\delta t} (\cos \omega t + \varphi_0) \quad (\text{рисунок 30}).$$

Отношение амплитудных значений напряжения в моменты времени  $mT$  и  $nT$ :

$$\frac{U_m}{U_n} = \frac{U_0 e^{-\delta m T}}{U_0 e^{-\delta n T}} = e^{(n-m)\delta T} = e^{(n-m)\lambda}, \text{ а логарифм этого отношения}$$

$\ln \frac{U_m}{U_n} = (n-m)\lambda$ . Отсюда логарифмический декремент затухания:

$$\lambda = \frac{1}{n-m} \ln \frac{U_m}{U_n}.$$

Если  $n = m + 1$ , то  $\lambda = \ln \frac{U_m}{U_{m+1}}$ . Это позволяет определить величину  $\lambda$  следующим образом: логарифмический декремент затухания

равен логарифму отношения предыдущей амплитуды колебаний к последующей. Величины соседних амплитуд напряжения на конденсаторе и период колебаний можно измерить с помощью осциллографа.

Затухание колебаний определяется в основном потерями в катушке индуктивности (см. схему ниже) и дополнительным сопротивлением  $R$ , которое может изменяться от 0 до  $R_{\max}$ .

### Измерения

1. Ознакомьтесь с принципиальной схемой лабораторной установки, проверьте правильность ее сборки (рисунок 31).
2. Получите у преподавателя задание для выполнения работы.
3. В соответствии с заданием подключите в схеме один из конденсаторов  $C_1, C_2, C_3$ . Дополнительное сопротивление  $R$  установите равным нулю.
4. Включите в сеть (220 В) осциллограф и генератор импульсов. Получите устойчивую картину колебаний на экране осциллографа.

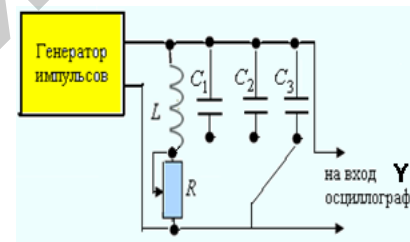


Рисунок 31 — Принципиальная схема и общий вид лабораторной установки

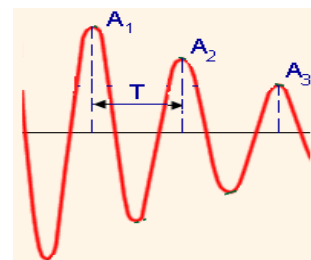


Рисунок 32

5. Постепенно увеличивая сопротивление  $R$ , наблюдайте за изменением затухания колебаний.

6. Установите опять величину  $R$  равной нулю. Измерьте амплитуды колебаний  $A_1, A_2, A_3$  (см. рисунок 32) в делениях шкалы. Измерьте период колебаний  $T$ . Результаты измерений запишите в таблицу 9.

7. Изменяйте величину  $R$  в соответствии с заданием и измеряйте соответствующие значения амплитуд и периода.

Таблица 9

Данные схемы: $L =$ _____ Гн										
№ опыта	$R$ , Ом	$A_1$ , дел.	$A_2$ , дел.	$A_3$ , дел.	Логарифмический декремент затухания			$T$ , с	$C$ , Ф	$Q$
					$\lambda_1 = \ln \frac{A_1}{A_2}$	$\lambda_2 = \ln \frac{A_2}{A_3}$	$\lambda_{cp}$			
1.										
2.										
3.										

8. Рассчитайте величину логарифмического декремента затухания для каждой величины  $R$  по измеренным значениям  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ .

9. Используя формулу для периода собственных колебаний в контуре с небольшим затуханием  $T = 2\pi\sqrt{LC}$ , определите емкость  $C$  включенного в схему конденсатора.

10. Рассчитайте добротность контура по формуле  $Q = \frac{\pi}{\lambda}$ .

11. Запишите ответ. Сформулируйте выводы по работе.

### Вопросы и задания для контроля

#### I уровень

1. Запишите уравнение зависимости заряда на обкладках от времени при свободных колебаниях в контуре.

2. Как записать уравнения зависимости от времени других колеблющихся величин в контуре?

3. Каким выражением определяется период электромагнитных колебаний в контуре, состоящем из конденсатора емкостью  $C$  и катушки индуктивностью  $L$ ?

4. Каким выражением определяется период электромагнитных колебаний в последовательном контуре, состоящем из конденсатора емкостью  $C$ , катушки индуктивностью  $L$  и резистора сопротивлением  $R$ ?

5. Какие величины характеризуют колебательную систему? Дайте их определение.

#### II уровень

6. Чему равна разность фаз между колебаниями заряда на обкладках конденсатора и силой тока в катушке?

7. Расскажите о превращениях энергии при свободных колебаниях в контуре.

8. От чего зависит скорость затухания колебаний в контуре?

#### III уровень

9. Дайте вывод дифференциального уравнения свободных колебаний в  $LC$ -контуре.

## ЛИТЕРАТУРА

### Основная

1. Савельев, И.В. Курс физики : Учебник. В 3-х т. Т. 2 : Электричество. Колебания и волны. Волновая оптика / И.В. Савельев. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. — 464 с.

2. Детлаф, А.А. Курс физики : учеб. пособие для вузов / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский.— 2-е изд., испр. и доп. — М.: Высш. шк., 1999. — 492 с.

3. Трофимова, Т.И. Курс физики : учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова.— 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1990. — 478 с

### Дополнительная

4. Иродов, И.Е. Электромагнетизм. Основные законы / И.Е. Иродов. — 3-е изд., испр. — М.: Лаборатория базовых знаний, 2000. — 335 с.

5. Наркевич, И.И. Физика для вузов. Электричество и магнетизм. Оптика. Строение вещества : учеб. пособие / И.И. Наркевич, Э.И. Волмянский, С.И. Лобко. — Мн.: Выш. шк., 1994. — 554 с.

6. Близнюк, И.Б. Лабораторный практикум по курсу общей физики : учеб.-метод. пособие / И.Б. Близнюк [и др.]. — Мн.: БГАТУ, 2004. — 124 с.

## III. Справочные сведения

### Физические константы

Название	Символ	Значение	Размерность
Гравитационная постоянная	$\gamma$ или G	$6,67 \times 10^{-11}$	$\text{Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-2}$
Ускорение свободного падения на поверхности Земли	$g_0$	9,8	$\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$
Скорость света в вакууме	c	$3 \times 10^8$	$\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$
Постоянная Авогадро	$N_A$	$6,02 \times 10^{23}$	$\text{моль}^{-1}$
Универсальная газовая постоянная	R	8,31	$\text{Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$
Постоянная Больцмана	k	$1,38 \times 10^{-23}$	$\text{Дж} \cdot \text{К}^{-1}$
Элементарный заряд	e	$1,6 \times 10^{-19}$	Кл
Масса электрона	$m_e$	$9,11 \times 10^{-31}$	кг
Электрическая постоянная	$\epsilon_0$	$8,85 \times 10^{-12}$	$\text{Ф} \cdot \text{м}^{-1}$
Магнитная постоянная	$\mu_0$	$4\pi \times 10^{-7}$	$\text{Гн} \cdot \text{м}^{-1}$
Постоянная Планка	h	$6,62 \times 10^{-34}$	$\text{Дж} \cdot \text{с}$

### Приставки и множители

#### для образования десятичных кратных и дольных единиц

Приставка	Символ	Множитель
дека	да	$10^1$
гекто	г	$10^2$
кило	к	$10^3$
мега	М	$10^6$
гига	Г	$10^9$
тера	Т	$10^{12}$

Приставка	Символ	Множитель
деци	д	$10^{-1}$
санти	с	$10^{-2}$
милли	м	$10^{-3}$
микро	мк	$10^{-6}$
нано	н	$10^{-9}$
пико	п	$10^{-12}$

**Удельное сопротивление и температурный коэффициент  
сопротивления металлических проволок**

Вещество	Алюминий	Железо (0,1%С)	Латунь	Медь	Нихром (67,5% Ni, 1,5% Mn, 16% Fe, 15% Cr)	Серебро
$\rho, 10^{-8}$ Ом·м	3,21	12,0	6—9	1,78	100 — 110	1,66
$\alpha, 10^{-3} K^{-1}$	3,8	6,2	1,0	4,3	0,2	3,6

**Удельное сопротивление и относительная диэлектрическая  
проницаемость некоторых диэлектриков**

Вещество	Бумага сухая	Гетинакс	Плексиглас (оргстекло)	Полистирол	Стекло	Эбонит
$\rho,$ Ом·см	$10^{13}-10^{14}$	$10^{10}-10^{11}$	$10^{13}$	$10^{17}-10^{19}$	$10^8-10^{17}$	$10^{15}-10^{16}$
$\epsilon$	2—2,5	5—6	3,5	2,4—2,6	4—16	2,5—3

**Удельная проводимость электролитов (Ом–1·см–1, при 18°C)**

Процентное содержание безводного электролита	Хлористый калий КСl	Хлористый натрий NaCl	Едкий натр NaOH	Серная кислота H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
5	0,0690	0,0672	0,1969	0,2085
10	0,1359	0,1211	0,3124	0,3915
15	0,2020	0,1642	0,3460	0,5435
20	0,2677	0,1957	0,3270	0,6527

**Точки Кюри некоторых веществ, °С**

Железо	Железо кремнистое (4,3% Si)	Кобальт	Никель	Пермаллой (22% Fe, 78% Ni)	Гадолиний	Магнетит Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Сплав Гейслера (61% Cu, 26% Mn, 13% Al)
+770	+690	+1130	+358	+550	+16	+572	+330

**Свойства ферромагнитных материалов**

Материалы	Относит. начальная проницае- мость	Относит. максимальная проницае- мость	Коэрцитивная сила, А/м	Индукция насыщения, Тл
Железо чистое	10 000	200 000	4	2,15
Железо техниче- ское	150	5000	80	2,15
Пермаллой	8000	100 000	4	1,08
Феррит	1000	2000	8	0,25

ДЛЯ ЗАМЕТОК

*Учебное издание*

ФИЗИКА

Магнетизм

Лабораторный практикум

Составители:

**Соболь** Валерий Романович

**Дымонт** Василий Петрович

**Гременок** Валерий Феликсович и др.

Ответственный за выпуск *В.Р. Соболь*

Технический редактор *М.А. Макрецкая*

Корректор *М.А. Макрецкая*

Компьютерная верстка *М.А. Макрецкая*

Подписано в печать 14.09.2009 г. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.  
Ризография. Усл. печ. л. 3,29. Уч.-изд. л. 2,73. Тираж 105 экз. Заказ 810.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет».

ЛИ № 02330/0131734 от 10.02.2006.

ЛП № 02330/0131656 от 02.02.2006.

Пр. Независимости, 99-2, 220023, Минск



**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра физики

**ФИЗИКА**

**Магнетизм**

**Минск  
БГАТУ  
2009**