

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО
ТРАНСПОРТА

**КРАСНОЯРСКИЙ ИНСТИТУТ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО
ТРАНСПОРТА**

Филиал ГОУ ВПО «Иркутский государственный
университет путей сообщения» в г. Красноярске

Л.А. Кузовникова

Е.А. Денисова

Н.Г. Замкова

ФИЗИКА

ВИРТУАЛЬНЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Учебное пособие

ЧАСТЬ 2. Раздел 4.

МАГНЕТИЗМ

Красноярск
КрИЖТ ИрГУПС
2011

УДК 537.2+537.6+537.8
К 89

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

А.Н. Втюрин, д-р физ.-мат. наук зам. директора Института физики СО РАН
М.С. Жандун, канд. физ.-мат. наук ст. преп. кафедры «Техническая физика»
Сибирского государственного аэрокосмического университета им. М.Ф.
Решетнева

В.В. Смелый, канд. техн. наук, зав. кафедрой «Общепрофессиональные
дисциплины» КрИЖТ ИрГУПС.

УДК 537.2+537.6+537.8
К 89

**Кузовникова, Л.А. Физика : Виртуальный лабораторный практикум :
учебное пособие. Ч. 2., Раздел 4. Магнетизм. /Л.А. Кузовникова, Е.А.
Денисова, Н.Г. Замкова ; КрИЖТ ИрГУПС. – Красноярск : КрИЖТ
ИрГУПС, 2011. - 49 с.**

*Настоящее издание является частью учебно-методического комплекса по
дисциплине «Физика», включающего учебную программу, конспект лекций,
виртуальный лабораторный практикум.*

*Настоящий лабораторный практикум содержит краткие теоретические
сведения, методику проведения лабораторных работ с компьютерными
моделями и порядок обработки результатов. Даны вопросы и задания для
самоконтроля.*

*Материал пособия размещен в последовательности, обеспечивающей
оптимальную работу студентов над выполнением лабораторных работ,
которые предусмотрены учебными планами специальностей очной и заочной
формы обучения: 190401 – «Электроснабжение железных дорог», 190402 –
«Автоматика, телемеханика и связь», 190302 – «Вагоны», 190303 –
«Электрический транспорт железных дорог», 190701 - "Организация перевозок и
управление на транспорте " , 270204 - "Строительство железных дорог, путь и
путевое хозяйство " , 654700 - "Информационные системы".*

Рекомендовано к печати методическим советом КрИЖТ ИрГУПС

Печатается в авторской редакции

© Л.А. Кузовникова, Е.А. Денисова,
Н.Г. Замкова, 2011
© Красноярский институт
железнодорожного транспорта, 2011

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Порядок выполнения лабораторных работ по физике	5
Пример оформления титульного листа.....	6
Требования к оформлению персонального отчета.....	7
Требования к оформлению графика.....	7
Раздел 4. Магнетизм	9
Лабораторная работа № 4.1 Магнитное поле	9
Лабораторная работа № 4.2 Определение удельного заряда частицы методом отклонения в магнитном поле.....	17
Лабораторная работа № 4.3 Электромагнитная индукция	25
Лабораторная работа № 4.4 Электромагнитные колебания.....	36
Приложения	48
Некоторые физические константы.....	48
Приставки и множители для образования десятичных кратных и дольных единиц.....	48
Греческий алфавит.....	48

ВВЕДЕНИЕ

Данный сборник содержит описания к лабораторным работам, в которых используются компьютерные модели, разработанные фирмой «Физикон».

Для начала работы необходимо дважды щелкнуть левой кнопкой мыши, когда ее маркер расположен над эмблемой сборника компьютерных моделей. После чего в появившемся на экране монитора перечне разделов физики выбрать раздел, в котором находится используемая в лабораторной работе компьютерная модель. Для этого необходимо дважды щелкнуть левой кнопкой мыши, установив ее маркер над названием выбранного раздела. Для запуска необходимой компьютерной модели подведите курсор мыши к её названию на экране монитора и нажмите дважды кнопку мыши.

Кнопки вверху картинки являются служебными. Предназначение каждой проявляется, когда маркер мыши располагается над нею в течение 1-2 секунд (без нажатия кнопок мыши). Кнопка с двумя вертикальными чертами «||» служит для остановки эксперимента, а рядом расположенные кнопки «▶|», «▶▶» – соответственно для шага и продолжения работы. Во внутреннем окне открытой Вами компьютерной модели сверху расположены служебные кнопки. Кнопка с изображением страницы служит для вызова теоретических сведений. Перемещать окна можно, зацепив (нажав и удерживая левую кнопку) мышью заголовок окна (имеющий синий фон). Закрытие окна теории обеспечивается нажатием кнопки с крестом в правом верхнем углу внутреннего окна.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ФИЗИКЕ

Этап 1. Домашняя подготовка

1. Для изучения сущности физических явлений и законов, которые предстоит исследовать в лабораторной работе, необходимо внимательно просмотреть содержание конспектов лекций по теме лабораторной работы, а также учебные пособия.

2. Оформить свой персональный конспект для допуска к ЛР (готовится дома на листах формата А4). (см. соответствующие требования ниже).

3. Выполнить Задания для допуска – вывод формул, решение задач.

Этап 2. Допуск к лабораторной работе.

1. Для допуска к выполнению измерений по лабораторной работе необходимо наличие персонального **конспекта** ЛР, выполненного **Задания для допуска** и результатов проведения **Тестирования** компьютерной модели.

2. Преподаватель допускает студента к работе, ставит свою подпись в конспекте студента (графа ДОПУСК в табличке на обложке) и определяет номер варианта задания.

Этап 3. Экспериментальная часть

1. Выполнение наблюдений и измерений опытов в соответствии с методическим руководством и указаниями преподавателя.

2. Заполнение таблиц измерений для отчета о проделанной работе.

3. Преподаватель проверяет таблицу измерений студента и ставит свою подпись в конспекте студента. Таблицы должны быть заполнены чернилами. Для всех величин в таблицах должна быть записана соответствующая единица измерения.

Этап 4. Обработка полученных результатов

1. Вычисление значений расчетных величин по рабочим формулам (расчеты **подробно** записываются в отчете **после написанной формулы**).

2. Построение графиков исследуемых зависимостей. Графики должны удовлетворять всем требованиям, приведенным ниже.

3. Расчеты необходимых величин по графикам.

4. Написание вывода по полученным результатам.

Этап 5. Защита лабораторной работы

1. Письменные ответы на вопросы для самостоятельной работы.
2. Выполнение **Дополнительных заданий** к лабораторной работе.
3. Предоставление полностью готового оформленного отчета о работе.
4. Собеседование с преподавателем об изученных физических явлениях и законах, полученных экспериментальных результатах (коллоквиумы).

Пример оформления титульного листа (первой страницы) отчета:

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
КРАСНОЯРСКИЙ ИНСТИТУТ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА -
филиал ФГБОУ ВПО
«Иркутский государственный университет путей сообщения» в г. Красноярске

Кафедра «Общепрофессиональные дисциплины»

Лабораторная работа №__
(Название)

Выполнил:
студент группы ____
ФИО _____
Проверил:
Преподаватель
ФИО _____

Допуск	Измерения	Зачет

Красноярск
год

Требования к оформлению персонального отчета

ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: (переписать полностью из описания).

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ (выписать основные формулы, определения, законы и пояснить каждый символ, входящий в формулу).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ (нарисовать чертеж, рисунок, схему и подписать наименования деталей, обозначений).

ЗАДАНИЯ ДЛЯ ДОПУСКА;

ТЕСТИРОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ;

ТАБЛИЦЫ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ (название, состав таблиц и их количество определить самостоятельно в соответствии с методикой измерений и обработкой их результатов).

ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА. В отчете должны присутствовать **подробные расчеты** величины после написанной формулы. В расчетах указываются единицы измерения физических величин. Все расчеты ведутся в системе СИ.

ГРАФИКИ;

ВЫВОДЫ;

ПИСМЕННЫЕ ОТВЕТЫ НА ВОПРОСЫ;

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ.

Требования к оформлению графика

- ✓ график должен быть построен на миллиметровой бумаге, размер не менее половины листа А4,
- ✓ над графиком - полное название графика **СЛОВАМИ**,
- ✓ на графике: оси декартовой системы, на концах осей - стрелки, обозначение величин, единицы измерения, 10^N
- ✓ на каждой оси - **РАВНОМЕРНЫЙ МАСШТАБ** (риски через равные промежутки, числа через равное количество рисок),
- ✓ на графике - экспериментальные и теоретические точки **ярко**,
- ✓ форма графика должна соответствовать теоретической зависимости (**не ломаная**)

Наиболее сложным для большинства студентов является **написание выводов** по результатам работы. Рекомендуется подходить к написанию выводов следующим образом:

1. Проанализировать *ожидаемые результаты* работы: что должно получиться по теории.
2. Проанализировать *реально полученные результаты*, указать сходства и различия теоретических и практических результатов.
3. *Обосновать* с точки зрения теории отмеченные *сходства и различия* в результатах: почему так получилось.

РАЗДЕЛ 4. МАГНЕТИЗМ

Лабораторная работа № 4.1

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Запустите программу «Открытая физика». Выберите «Электричество и магнетизм» и «Магнитное поле прямого тока».

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Экспериментальное определение величины магнитной постоянной.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

♦ Электромагнитное поле – это вид материи, переносящий действие одной заряженной частицы на другую.

Подобно тому, как в пространстве, окружающем НЕПОДВИЖНЫЕ электрические заряды, возникает электрическое поле, так и в пространстве, которое окружает электрические токи (ДВИЖУЩИЕСЯ электрические заряды), возникает магнитное поле.

♦ Магнитное поле – это поле, которое создается электрическим током, движущимся зарядом или магнитом.

Электрическое поле действует как на неподвижные, так и на движущиеся электрические заряды. *Магнитное поле действует только на движущиеся заряды и не действует на неподвижные заряды.*

♦ Элемент тока $I d\vec{l}$ – это вектор, численно равный произведению силы тока I на элемент длины проводника $d\vec{l}$ и направленный по направлению тока. Элемент тока – это аналог движущегося точечного заряда:

$$I \cdot d\vec{l} = \frac{dq}{dt} d\vec{l} = dq \frac{d\vec{l}}{dt} = dq \cdot \vec{v} \quad (1)$$

♦ Магнитная индукция \vec{B} , Тл (тесла) - силовая характеристика магнитного поля. Это вектор, численно равный максимальной силе \vec{F}_{\max} , действующей на единичный элемент тока $I d\vec{l}$, помещенный в данную точку магнитного поля:

$$|\vec{B}| = \frac{|\vec{F}_{\max}|}{|I d\vec{l}|} \quad (2)$$

♦ **Линии магнитной индукции** – линии, в каждой точке которых вектор магнитной индукции \vec{B} направлен по касательной. Направление линий индукции связано с направлением тока *правилом правого винта* (рис. 1).

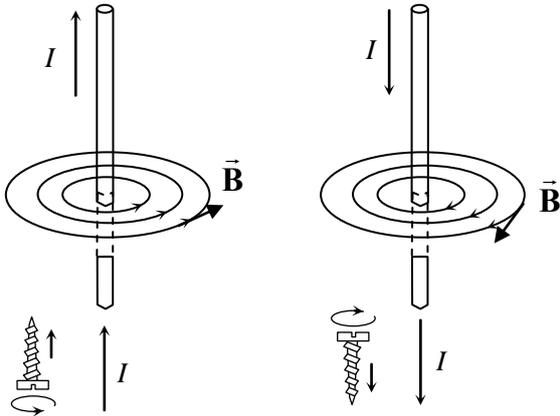


Рисунок 1

Если направление поступательного движения буравчика совпадает с направлением прямого тока I , то направление вращения его рукоятки укажет направление линий магнитной индукции \vec{B} .

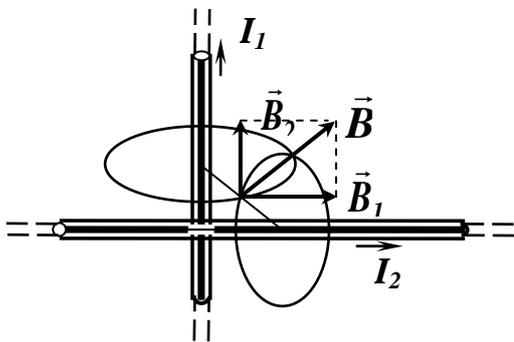


Рисунок 2

♦ **Принцип суперпозиции**

(рис. 2): если магнитное поле в точке создается несколькими токами, то результирующая индукция находится как векторная сумма индукций полей, создаваемых каждым током в отдельности

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i \quad (3)$$

На рис.3 изображены силовые линии некоторых конфигураций токов.

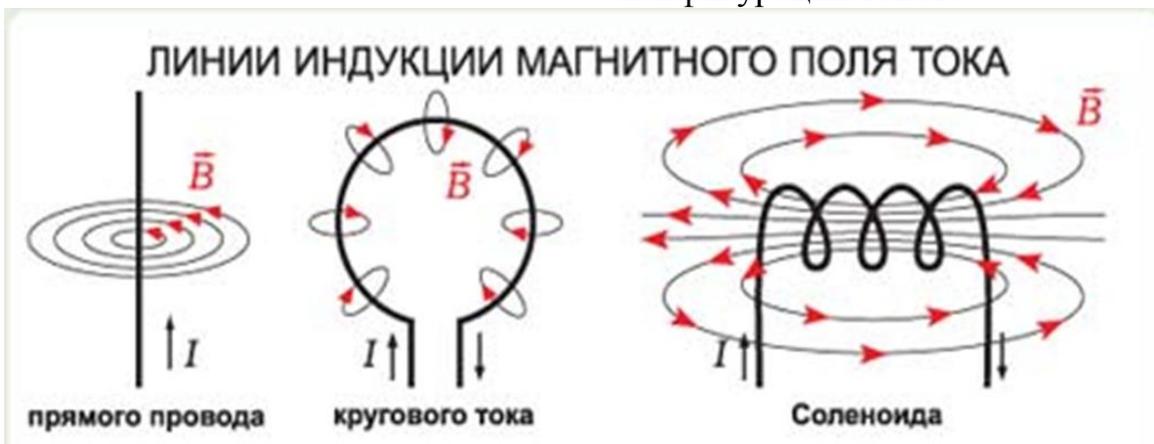


Рисунок 3

Линии индукции магнитного поля (силовые линии) **всегда замкнуты**. Для прямого тока они представляют собой концентрические окружности.

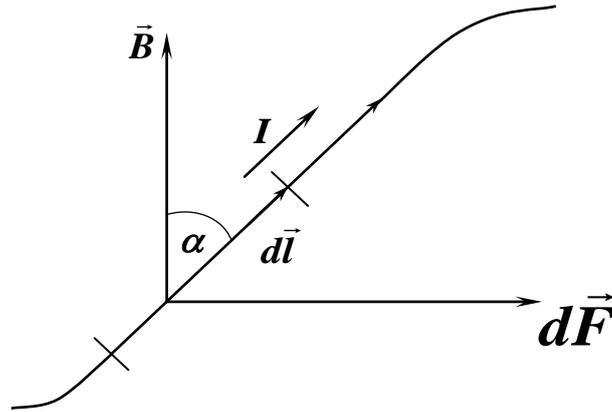


Рисунок 4

♦Закон Ампера - на отрезок проводника длиной $d\vec{l}$ с током I , помещенный в магнитное поле \vec{B} , действует магнитная сила (сила Ампера), величина которой равна

$$dF_A = IBdl \sin \alpha \quad (4)$$

где α – угол между вектором \vec{B} и направлением элемента тока $I d\vec{l}$ (рис. 4).

♦Направление силы Ампера определяется правилом левой руки: Если расположить левую руку так, чтобы четыре пальца совпадали с направлением тока, а вектор \vec{B} входил в ладонь, то большой палец укажет направление силы Ампера.

В векторном виде
$$d\vec{F}_A = I [d\vec{l}, \vec{B}]. \quad (5)$$

Сила Ампера, действующая на прямой проводник с током I , длиной l помещенный в однородное магнитное поле \vec{B} , равна

$$F_A = IBl \sin \alpha. \quad (6)$$

♦Закон Био-Савара-Лапласа - каждый элемент $d\vec{l}$ проводника с током I создает магнитное поле (рис. 5), индукция которого в точке с радиус-вектором \vec{r} относительно элемента $d\vec{l}$ определяется как:

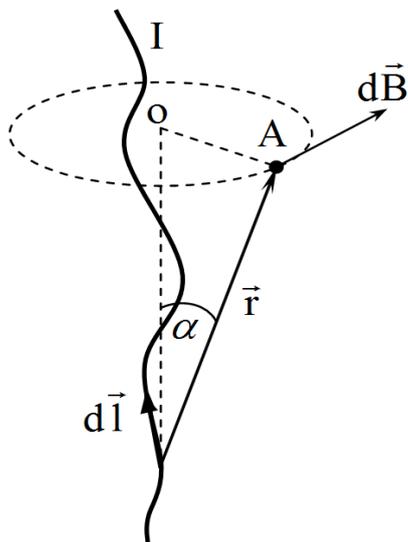


Рисунок 5

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu I [d\vec{l}, \vec{r}]}{4\pi r^3}, \quad (7)$$

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная,

$\mu = \frac{F_{в\ среде}}{F_{в\ вакууме}}$ – магнитная

проницаемость среды - физическая величина, показывающая во сколько раз сила магнитного взаимодействия в среде отличается от силы взаимодействия в вакууме.

Направление вектора $d\vec{B}$ определяется по правилу правого буравчика. Рукоятку буравчика при этом следует вращать от первого вектора ($d\vec{l}$) ко второму (\vec{r}). Вектор $d\vec{B}$ всегда направлен перпендикулярно к плоскости, проходящей через вектора $d\vec{l}$ и \vec{r} . Величина вектора магнитной индукции $d\vec{B}$ элемента тока определяется выражением:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin \alpha}{r^2}, \quad (8)$$

где α – угол между векторами $d\vec{l}$ и \vec{r} .

Согласно принципу суперпозиции (3) индукция \vec{B} результирующего поля проводника с током равна векторной сумме вкладов $d\vec{B}$ отдельных элементов $d\vec{l}$ проводника, т.е. рассчитывается с помощью криволинейного интеграла по длине L проводника:

$$\vec{B} = \int_L d\vec{B}. \quad (9)$$

Магнитная индукция B поля, создаваемого бесконечным прямолинейным проводником с током I , на расстоянии r от него:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}. \quad (10)$$

ЗАДАНИЕ ДЛЯ ДОПУСКА

Решите задачи.

Задача 1. В воздухе ($\mu=1$) расположены два прямых проводника с током I_1 и I_2 на расстоянии r друг от друга. (Отрицательный ток направлен в плоскость рисунка \otimes , положительный - из плоскости рисунка \odot).

1. Нарисуйте силовые линии магнитных полей, создаваемых каждым током.
2. Определите и отметьте на рисунке направление векторов магнитной индукции B_1 и B_2 в точках, где расположены токи. Используя данные таблицы 1, вычислите их значения.
- 3.

ТАБЛИЦА 1. Числовые значения I_1 , I_2 и r :

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$I_1(\text{А}) =$	-2	-1.8	-1.6	-1.4	-1.2	-1	-0.8	2	1.8	1.6	1.4	1.2	1	0.8	-1.8	1.4
$I_2(\text{А}) =$	1.2	1	0.8	-1.8	-2	-1.8	-1.6	-1.4	-1.2	-1	2	1.8	1.6	1.4	1.2	1
$r(\text{м}) =$	1	1.05	1.1	1.15	1.2	1.25	1.3	0.95	0.9	0.85	1.35	1.4	0.9	0.8	1.3	0.75

4. Определите и отметьте на рисунке направление силы Ампера, действующей на проводники с током. Вычислите ее величину

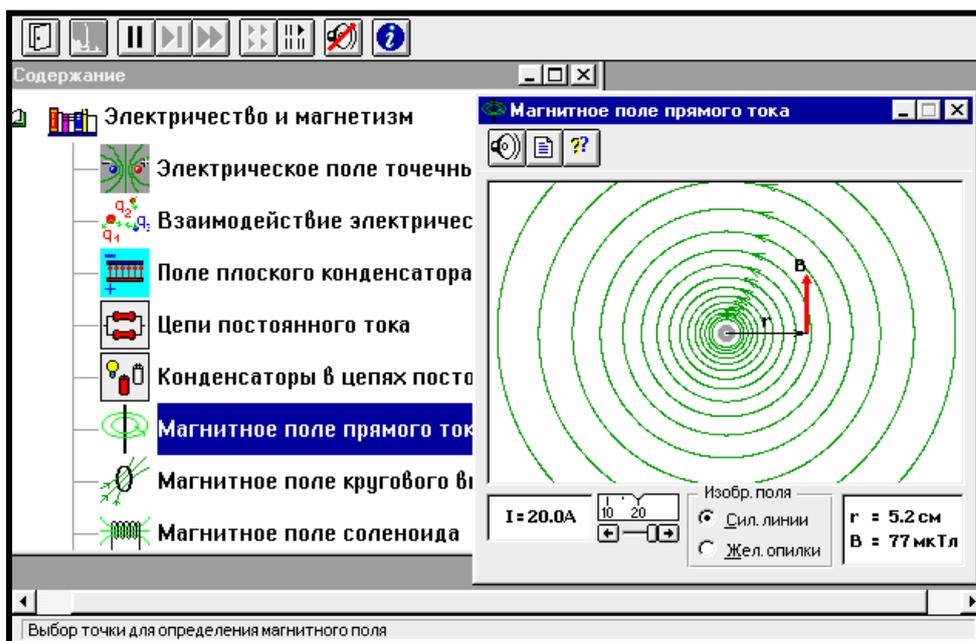
Задача 2. Ток $I_0 = 10 \text{ А}$ помещается в точку, находящуюся на середине линии, соединяющей токи I_1 и I_2 . Направлен I_0 вверх от плоскости рисунка.

1. Определите величину и направление вектора магнитной индукции в этой точке.
2. Определите величину и направление силы Ампера \vec{F}_A , действующей на каждый метр проводника с током I_0 со стороны токов I_1 и I_2 .

Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.

Приступайте к измерениям.

МЕТОДИКА и ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ



1. Запустите программу. Выберите «Электричество и магнетизм» и «Взаимодействие параллельных токов».
2. Внимательно рассмотрите рисунок. Найдите регуляторы с движками, задающие значения силы тока и расстояния между проводниками.
3. **Протестируйте модель.** Для этого установите значения токов и расстояния между ними, соответствующие Вашему варианту в задаче №1 (см. Задание для допуска). Заполните таблицу 2.

ТАБЛИЦА 2. Тестирование модели.

$I_1 =$	$I_2 =$	$r =$	
	\vec{B}_{12}	\vec{B}_{21}	\vec{F}_A
Результаты расчетов			
Результаты измерений			

Получите у преподавателя допуск для выполнения лабораторной работы.

Приступайте к измерениям.

ЗАДАНИЕ 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ МАГНИТНОЙ ПОСТОЯННОЙ.

4. Выберите «Электричество и магнетизм» и работу «Магнитное поле прямого тока». Наблюдайте линии индукции МП прямого провода.
5. Зацепив мышью, перемещайте движок регулятора тока. Зафиксируйте величину тока I_1 , указанную в таблице 1 для Вашего варианта.
6. Перемещая мышью «руку» вблизи провода, нажимайте левую кнопку мыши на расстояниях r до оси провода, указанных в таблице . Для данного значения r записывайте в таблицу 3 величину магнитной индукции B .

ТАБЛИЦА 3. Результаты измерений (9 столбцов)

	r (см) =	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	$1/r, м^{-1}$									
$I_1 =$	$B_1, Тл$									
$I_2 =$	$B_2, Тл$									

7. Повторите измерения для значения тока I_2 из таблицы .
8. Вычислите и запишите в таблицу 3 значения для второй строки.
9. Постройте на одном листе графики зависимости индукции магнитного поля (B_1 и B_2) прямого провода с током от обратного расстояния ($1/r$).
10. По тангенсу угла наклона графиков определите магнитную постоянную, используя формулу

$$\mu_0 = \frac{2\pi}{I} \frac{\Delta(B)}{\Delta(\frac{1}{r})}$$

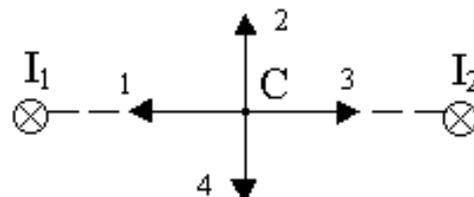
11. Запишите ответы и сделайте вывод.

Письменно ответьте на следующие вопросы

1. Назовите источники магнитного поля. На какие объекты действует магнитное поле?

2. Какая величина является силовой характеристикой магнитного поля? В каких единицах она измеряется?
3. Как определить направление вектора магнитной индукции?
4. Дайте определение линии индукции магнитного поля.
5. Сформулируйте принцип суперпозиции для МП.
6. Какие силы действуют между движущимися зарядами?
7. Запишите наиболее общее выражение для силы Ампера. Как определить величину и направление силы Ампера?
8. Как взаимодействуют два параллельных проводника, если электрический ток в них протекает в одном направлении? В противоположных направлениях?
9. Сформулируйте закон Био - Савара - Лапласа.

10. Какое из указанных на рисунке направлений в точке С совпадает с направлением вектора магнитной индукции поля двух параллельных бесконечно длинных проводников с током, если $I_1 = 2I_2$?



11. Каким будет наибольшее и наименьшее значение силы, действующей на проводник длиной 2 м, где сила тока 10 А, при различных положениях провода в магнитном поле, индукция которого равна 2 Тл?
12. В магнитное поле внесены два проводника с токами, направления которых показаны на рисунке. Каково направление силы Ампера, действующей на каждый проводник?

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЧАСТИЦЫ
МЕТОДОМ ОТКЛОНЕНИЯ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

Запустите программу «Открытая физика». Выберите «Электричество и магнетизм» и «Масс-спектрометр».

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Экспериментальное определение величины удельного заряда.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

♦ **Сила Лоренца** – это сила, которая действует на заряд, со стороны электромагнитного поля.

Если проводник с током находится в магнитном поле, то на него действует сила Ампера. Сила Ампера $dF_A = Idl \cdot B \sin \alpha$ (4) действует на все dn частиц с зарядом q , находящихся в элементе проводника dl . Учитывая, что $I = \frac{dQ}{dt} = \frac{q \cdot dn}{dt}$, получим $dF_A = q \cdot dn \frac{dl}{dt} B \sin \alpha$.

На одну частицу действует магнитная сила $F_L = \frac{dF_A}{dn}$

$$F_L = qv \cdot B \sin \alpha, \quad (1)$$

Где $v = \frac{dl}{dt}$ – скорость частицы.

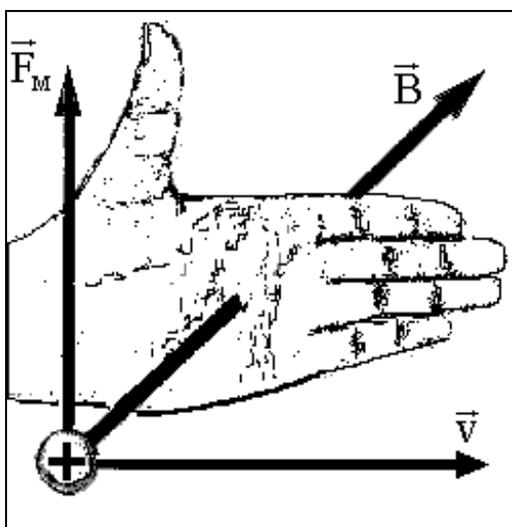


Рисунок 6

♦ **Направление силы Лоренца**

определяется *правилом левой руки* (рис. 6) для положительного заряда. Если заряд отрицательный, то \vec{F}_L направлена *противоположно*.

В векторном виде сила Лоренца

$$\vec{F}_L = q[\vec{v}\vec{B}] \quad (2)$$

Если имеются одновременно электрическое и магнитное поля, то полная сила Лоренца, действующая на заряженную частицу, равна

$$\vec{F}_L = q\vec{E} + q[\vec{v}\vec{B}]. \quad (3)$$

♦ Движение заряженной частицы в магнитном поле.

Магнитная сила $F_L = qv \cdot B \sin \alpha$ всегда направлена перпендикулярно к скорости заряженной частицы, поэтому она работы над частицей не совершает. При движении заряженной частицы в постоянном магнитном поле, ее энергия не меняется. Магнитная сила способна только искривить траекторию заряда, но не может изменить величину его скорости.

Работа магнитной силы всегда равна нулю.

Возможны три случая движения заряженной частицы в магнитном поле.

1. Частица движется вдоль силовых линий магнитной индукции. В этом случае угол между направлением скорости \vec{v} частицы и вектора магнитной индукции $\alpha=0$ (или π); $\sin \alpha = 0$ и сила Лоренца тоже равна нулю. Магнитное поле на частицу не действует, и она движется прямолинейно и равномерно.

2. Заряженная частица движется в магнитном поле перпендикулярно ($\alpha = 90^\circ$) линиям магнитной индукции \vec{B} ($\vec{v} \perp \vec{B}$, рис. 7а); $\sin \alpha = 1$ и сила Лоренца $F_L = qv \cdot B$. Частица будет двигаться по окружности радиуса R .

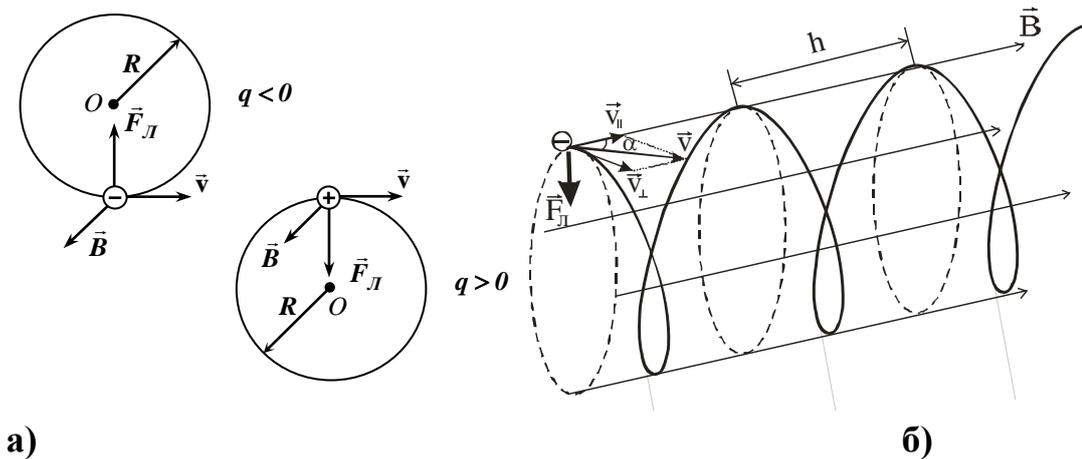


Рисунок 7

В этом случае сила Лоренца играет роль центростремительной силы. Согласно второму закону Ньютона: $\frac{mv^2}{R} = qvB$, где $a_n = \frac{v^2}{R}$ - центростремительное (нормальное) ускорение.

Радиус окружности, по которой движется заряженная частица

$$R = \frac{mv}{qB}. \quad (4)$$

◆ Удельный заряд $\frac{q}{m}$ - отношение заряда частицы q к ее массе m .

Период обращения частицы по окружности не зависит ни от скорости частицы, ни от радиуса траектории, он определяется только удельным зарядом частицы и магнитной индукцией поля.

$$T = 2\pi \frac{m}{qB} \quad (5)$$

3. Заряженная частица движется в магнитном поле под углом α к линиям магнитной индукции \vec{B} , отличным от прямого (рис. 7б).

Разложим вектор скорости на две составляющие: вдоль направления поля $v_x = v \cos\alpha$ и перпендикулярно ему $v_{\perp} = v \sin\alpha$ (рис. 7б). Движение частицы можно представить как сумму двух движений:

- равномерного прямолинейного движения вдоль силовых линий со скоростью $v_x = v \cos\alpha$ и

- равномерного движения по окружности в плоскости, перпендикулярной к вектору \vec{B} , со скоростью $v_{\perp} = v \sin\alpha$.

Радиус окружности

$$R = \frac{mv_{\perp}}{qB} = \frac{mv \cdot \sin\alpha}{qB}. \quad (6)$$

Траектория движения представляет собой винтовую линию, ось которой совпадает с направлением вектора магнитной индукции \vec{B} .

Шаг спирали

$$h = v_x T = 2\pi \frac{m}{q} \frac{v \cos\alpha}{B}. \quad (7)$$

ЗАДАНИЕ ДЛЯ ДОПУСКА

Задача. Получите формулу (5) для периода обращения заряда по окружности.

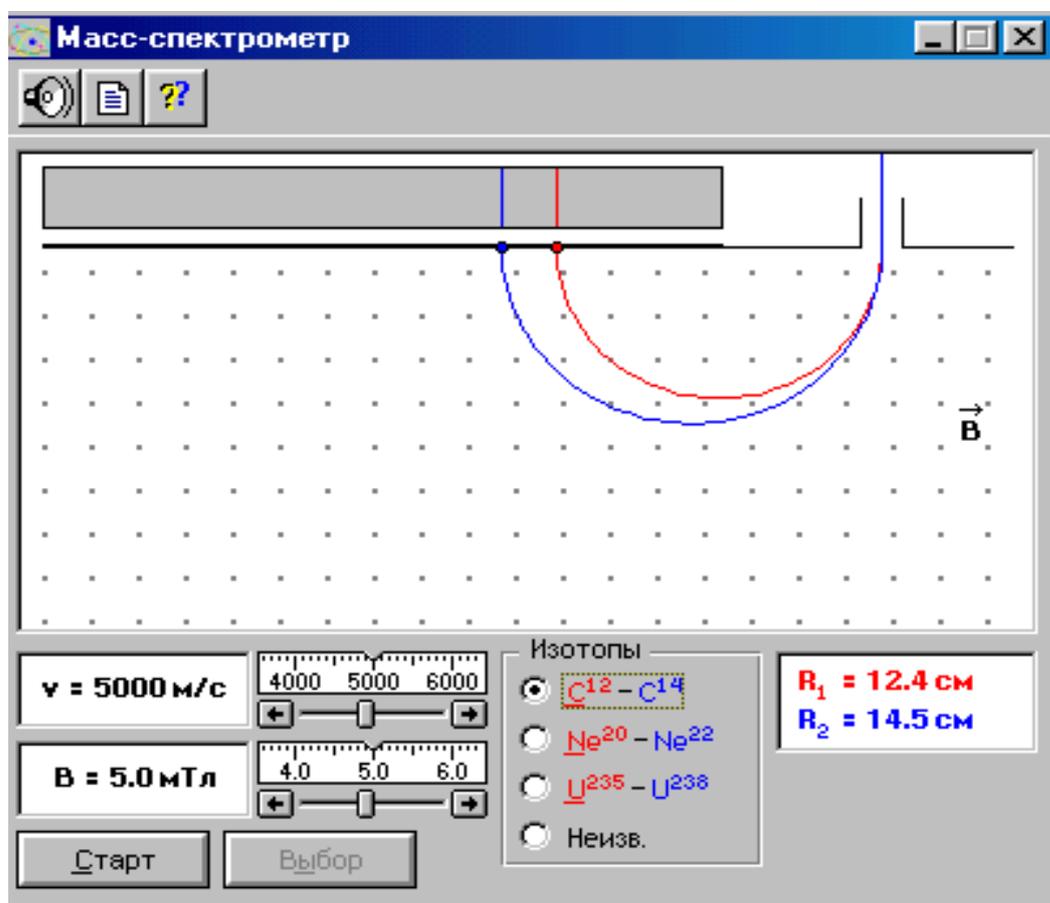
Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.

Приступайте к измерениям.

МЕТОДИКА и ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

ЗАДАНИЕ 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЧАСТИЦ.

1. Запустите программу «Электричество и магнетизм». Выберите: «Масс-спектрометр».



Атомы состоят из ядра и электронных оболочек. Свойства атомов определяются тем, сколько протонов (положительно заряженных элементарных частиц) содержит ядро. Ядро помимо протонов содержит и нейтроны. При равном количестве протонов ядро может содержать разное количество нейтронов.

ИЗОТОПЫ - атомы с одинаковым количеством протонов в ядре, но с разным количеством нейтронов. Они отличаются по массе на одну или несколько единиц атомной массы (а.е.м.).

МАСС-СПЕКТРОМЕТРОМ называется прибор, для разделения ионизованных молекул и атомов (изотопов) по их массам, основанный на воздействии электрических и магнитных полей на пучки ионов, летящих в вакууме.

Прежде чем, запустить изотопы в масс-спектрометр, их нужно

ионизовать, т.е. придать им электрический заряд. Это можно сделать, например, с помощью электронного удара. Атомы или молекулы вводятся в так называемый источник ионов, где они подвергаются бомбардировке пучком электронов. Электроны - легкие по сравнению с молекулами отрицательно заряженные частицы - сталкиваясь с молекулами, вырывают из их электронных оболочек электроны и превращают молекулы в ионы.

Простейшую модель масс-спектрографа вы видите на мониторе.

2. Нажмите мышью кнопку «Изотопы C^{12} - C^{14} ».
3. Подведите маркер мыши к движку регулятора величины магнитной индукции, нажмите левую кнопку мыши и, удерживая ее в нажатом состоянии, двигайте движок, установив числовое значение B , взятое из таблицы 1 для Вашего варианта (для случая Изотопы C^{12} - C^{14}).
4. Аналогичным образом, зацепив мышью движок регулятора скорости, установите первое значение скорости из таблицы 1.

ТАБЛИЦА 1. Значения магнитной индукции и скорости.

<i>Ва ри ант</i>	Изотопы C^{12} - C^{14}						Изотопы Ne^{20} - Ne^{22}					
	$B,$ мТл	$v_1,$ м/с	$v_2,$ м/с	$v_3,$ м/с	$v_4,$ м/с	$v_5,$ м/с	$B,$ мТл	$v_1,$ м/с	$v_2,$ м/с	$v_3,$ м/с	$v_4,$ м/с	$v_5,$ м/с
1	1.8	3200	3500	3700	4000	4200	4.2	4000	4500	5000	5500	6000
2	1.9	3200	3500	3700	4000	4200	4.3	4000	4500	5000	5500	6000
3	2.0	3300	3600	3800	4100	4300	4.4	4000	4500	5000	5500	6000
4	2.1	3400	3700	3900	4200	4400	4.5	4000	4500	5000	5500	6000
5	2.2	3400	3700	3900	4200	4400	4.6	4100	4600	5100	5600	6100
6	2.3	3500	3800	4000	4300	4500	4.7	4100	4600	5100	5600	6100
7	2.4	3500	3800	4000	4300	4500	4.8	4300	4800	5300	5800	6300
8	2.5	3600	3900	4100	4400	4600	4.9	4300	4800	5300	5800	6300
9	2.6	3600	3900	4100	4400	4600	5.0	4500	5000	5500	6000	6500
10	2.7	3900	4200	4400	4700	4900	5.1	4500	5000	5500	6000	6500
11	2.8	3900	4200	4400	4700	4900	5.2	4600	5100	5600	6100	6600
12	2.9	4200	4500	4700	5000	5200	5.3	4600	5100	5600	6100	6600
13	3.0	4500	4800	5000	5300	5500	5.4	4700	5200	5700	6200	6700
14	3.1	4500	4800	5000	5300	5500	5.5	5000	5500	6000	6500	7000
15	3.2	5000	5300	5500	5800	6000	5.6	5000	5500	6000	6500	7000
16	3.3	5000	5300	5500	5800	6000	5.7	5300	5800	6300	6800	7300

ТАБЛИЦА 2. Результаты измерений и расчётов

Изотопы C^{12} - C^{14} , $B =$						Изотопы Ne^{20} - Ne^{22} , $B =$					
$v, м/с$						$v, м/с$					
$R_1, см$						$R_1, см$					
$R_2, см$						$R_2, см$					
$t, с$						$t, с$					
$q_1/m_1, Кл/кг$						$q_1/m_1, Кл/кг$					
$q_2/m_2, Кл/кг$						$q_2/m_2, Кл/кг$					
Табличные значения: $q_1/m_1 =$ $q_2/m_2 =$						Табличные значения: $q_1/m_1 =$ $q_2/m_2 =$					

5. Нажмите мышью кнопку «Старт» и одновременно запустите секундомер. Проследите за движением двух изотопов в магнитном поле модельного масс-спектрометра и по секундомеру определите время этого движения.
6. Запишите в таблицу 2 значения радиусов окружностей, по которым двигались эти изотопы (они показаны красным и синим цветом в правом углу окна) и время движения изотопов.
7. Прodelайте пункты 4-6 для других значений скоростей из таблицы 1 и заполните таблицу 2.
8. Нажмите мышью кнопку «Изотопы Ne^{20} - Ne^{22} », проведите измерения по пунктам 3-7 и заполните вторую часть таблицы 2.
9. Нажмите мышью кнопку «Неизвестный элемент». Установите числовое значение B , взятое из таблицы 3 для Вашего варианта.

ТАБЛИЦА 3. Значения магнитной индукции для неизвестного элемента.

Неизвестный элемент																
Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$B, мТл$	9,0	9,1	9,2	9,3	9,4	9,5	9,6	9,7	9,8	9,9	10	8,8	8,9	8,7	8,6	10

ТАБЛИЦА 4. Результаты измерений и расчётов для неизвестного элемента

Неизвестный элемент, $B =$					
$v, м/с$	1600	1800	2000	2200	2400
$R_1, см$					
$R_2, см$					
$t, с$					
$q_1/m_1, Кл/кг$					
$q_2/m_2, Кл/кг$					
Значения массового числа изотопов неизвестного элемента: _____					
Неизвестный элемент _____					

10. Установите первое значение скорости из таблицы 4. По секундомеру определите время движения изотопов. Запишите в таблицу 4 это время и значения радиусов окружностей, по которым двигались изотопы.

11. Прделайте то же самое для других значений скоростей из таблицы 4.

12. Вычислите значения удельных зарядов изотопов углерода, неона и неизвестного химического элемента по формуле (4) и запишите полученные значения в соответствующие графы таблиц.

13. Определите табличные значения удельных зарядов исследованных изотопов. Для этого нужно знать заряд и массу изотопа. В данной работе заряды всех изотопов равны $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл. Для того, чтобы рассчитать массу изотопа, надо умножить массовое число (из таблицы Менделеева) на атомную единицу массы (а.е.м.) $= 1,660 \cdot 10^{-27}$ кг.

Сравните рассчитанные значения удельных зарядов с полученными в опыте.

14. Определите неизвестный элемент. Для этого, найдите массовое число неизвестного элемента и по таблице Менделеева определите элемент.

15. Постройте график зависимости времени пролёта изотопов в камере масс-спектрометра от их скорости и сделайте выводы по результатам анализа этого графика.

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ:

Электрон, прошедший ускоряющую разность потенциалов U , влетает в однородное магнитное поле с индукцией $B=0,1$ Тл перпендикулярно линиям индукции поля. Вектор \vec{B} направлен в плоскость рисунка.

Масса электрона $m=9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, заряд электрона $q= -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

ТАБЛИЦА 5. Числовые значения U

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
$U, В$	-1000	-1500	-2000	-2500	-3000	-3500	-4000	-4500
Вариант	9	10	11	12	13	14	15	16
$U, В$	-1200	-1700	-2200	-2700	-3200	-3700	-4200	-4700

ОПРЕДЕЛИТЕ:

- 1) кинетическую энергию электрона.
- 2) скорость электрона и обозначить на рисунке ее направление.
- 3) силу Лоренца, действующую на электрон. Обозначить на рисунке ее направление.
- 4) ускорение электрона. Обозначить на рисунке его направление.
- 5) радиус окружности, по которой движется электрон. Обозначить его на рисунке.
- 6) период обращения электрона.

Лабораторная работа 4.3
ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Экспериментальное подтверждение закономерностей явления электромагнитной индукции (ЭМИ).

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

♦ **Элементарным магнитным потоком** $d\Phi_B$ через физически малый элемент поверхности площадью dS (рис.8) называется скалярное произведение вектора индукции магнитного поля \vec{B} на вектор нормали \vec{n} к данному элементу поверхности и на площадь dS :

$$d\Phi_B = (\vec{B} \vec{n}) \cdot dS = B \cdot dS \cdot \cos \alpha \quad (1)$$

♦ **Магнитным потоком** Φ_B через поверхность площадью S называется сумма всех элементарных потоков через все элементы этой поверхности (интеграл по поверхности):

$$\Phi_B = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (2)$$

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 м²:
 $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2$.

Явление электромагнитной индукции заключается в том, что в замкнутом проводящем контуре при изменении магнитного потока (т.е. потока вектора B), охватываемого этим контуром, возникает электрический ток.

♦ **Индукционным током** называется ток, возникающий в контуре при изменении магнитного потока (I_i).

Условием существования электрического тока в замкнутом контуре является наличие электродвижущей силы, поддерживающей разность потенциалов. Следовательно, при изменении магнитного потока, пронизывающего замкнутый контур, в нем возникает э.д.с., которую называют **э.д.с. индукции** (ε_i).

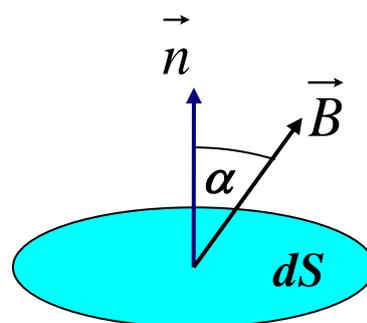


Рисунок 8

Если контур замкнут, то ЭДС индукции проявляется в возникновении электрического индукционного тока

$$I_i = \varepsilon_i / R, \quad (3)$$

где R - сопротивление контура.

Если контур разомкнут, то на концах проводника возникает разность потенциалов, равная ε_i .

Значение ε_i совершенно не зависит от того, каким образом осуществляется изменение магнитного потока Φ_B , и определяется лишь скоростью его изменения, т.е. величиной $d\Phi_B/dt$.

♦ **Закон Фарадея:** Э.д.с. электромагнитной индукции в контуре, площадь которого пронизывается изменяющимся во времени магнитным потоком, прямо пропорциональна скорости изменения

магнитного потока $\frac{d\Phi}{dt}$ сквозь поверхность, ограниченную этим контуром, т.е.

$$\varepsilon_i = \frac{d\Phi_B}{dt}; \quad \text{где} \quad \Phi_B = \int_S B_n dS \quad (4)$$

Индукционный ток можно вызвать двумя различными способами. На рисунке 9 изображены катушка K с током I (она создает магнитное поле) и рамка P с гальванометром Γ – индикатором индукционного тока.

1-й способ – перемещение рамки P в поле неподвижной катушки K .

2-й способ – рамка P неподвижна, но изменяется магнитное поле – или за счет движения катушки K , или вследствие изменения силы тока I в ней, или в результате того и другого вместе.

Направление индукционного тока (а значит, и знак э.д.с. индукции) определяется **правилом Ленца**: индукционный ток направлен так, чтобы своим магнитным полем противодействовать изменению магнитного потока, которым он вызван. Правило Ленца имеет глубокий физический смысл – оно выражает закон сохранения энергии.

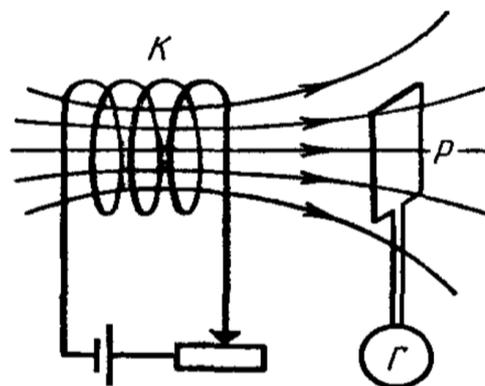


Рисунок 9

Направление индукционного тока определяется следующим образом (рис. 10):

1. Установить направление внешнего магнитного поля \vec{B} .
2. Определить, увеличивается или уменьшается поток вектора магнитной индукции внешнего поля.
3. По правилу Ленца указать направление вектора магнитной индукции \vec{B}_i индукционного тока.
4. По правилу правого винта определить направление индукционного тока в контуре.

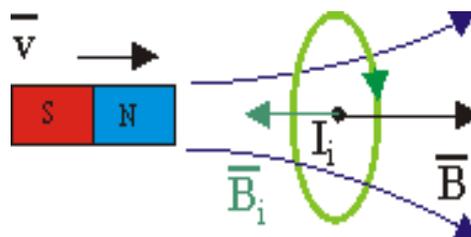


Рисунок 10

♦ **Закон электромагнитной индукции** (объединяет закон Фарадея и правило Ленца):

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (5)$$

электродвижущая сила электромагнитной индукции в замкнутом проводящем контуре численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока сквозь поверхность, натянутую на этот контур.

В формуле (5) под Φ_B в общем случае следует понимать полный магнитный поток сквозь поверхность, натянутую на контур, который содержит N витков (катушка или соленоид).

♦ Полный магнитный поток $\psi = N \cdot \Phi_B$ называют **потокосцеплением**.

Тогда

$$\varepsilon_i = - \frac{d\psi}{dt} \quad (6)$$

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. Это случай, 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.

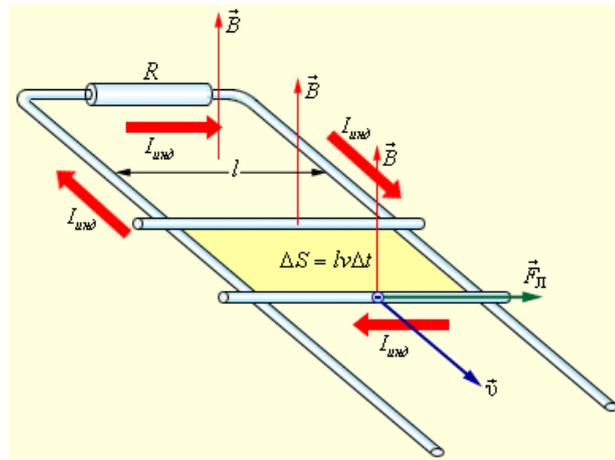


Рисунок 11. Возникновение ЭДС индукции в движущемся проводнике. Указана составляющая силы Лоренца, действующей на свободный электрон.

Рассмотрим простейший замкнутый контур, изображенный на рис.11. При движении одной из сторон контура длиной l со скоростью \vec{v} вместе с ней будут двигаться электроны проводимости. Следовательно, на каждый электрон проводимости действует сила Лоренца

$$\vec{F}_L = -e[\vec{v} \cdot \vec{B}] , \quad (7)$$

направленная вдоль перемычки, в результате электроны будут перемещаться по перемычке направо и по ней пойдет ток I , направленный налево. Это и есть индукционный ток. Перераспределившиеся заряды перемычки создадут электрическое поле (**разность потенциалов, равную эдс**), которое возбудит индукционный ток и в остальных участках контура.

Работа силы F_L на пути l равна

$$A = F_L \cdot l = e v B l. \quad (8)$$

По определению ЭДС

$$\varepsilon_i = \frac{A}{e} = vBl$$

Если сопротивление всей цепи равно R , то по ней будет протекать индукционный ток, равный

$$I_{\text{инд}} = \varepsilon_i / R \quad (9)$$

2. Вторая причина изменения магнитного потока, пронизывающего контур, – изменение 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.

Переменное магнитное поле порождает особое вихревое электрическое поле, которое является причиной возникновения ЭДС индукции и индукционного тока в контуре.

Линии напряженности магнитного поля концентрически охвачены линиями напряженности электрического поля (силовые линии такого электрического поля замкнуты). 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**.

Явления индукции в движущихся и неподвижных проводниках **протекают одинаково** (описываются формулой Фарадея), но физическая причина возникновения индукционного тока оказывается в этих двух случаях различной: в случае движущихся проводников э.д.с. индукции обусловлена **силой Лоренца**; в случае неподвижных проводников причина возникновения э.д.с. индукции – **вихревое электрическое поле**, порождаемое изменением магнитного поля.

Электромагнитная индукция возникает во всех случаях, когда изменяется магнитный поток сквозь контур. Если в контуре течет изменяющийся во времени ток, то магнитное поле этого тока также будет изменяться. Это влечет за собой изменение магнитного потока через контур, а, следовательно, и появление э.д.с. индукции.

♦Изменение тока в контуре ведет к возникновению э.д.с. индукции в этом же самом контуре. Это явление называется **самоиндукцией**.

В соответствии с законом Био-Савара-Лапласа магнитная индукция ***B*** пропорциональна силе тока, вызвавшего поле. Отсюда вытекает, что ток ***I*** в контуре и создаваемый им полный магнитный поток **Φ_B** через контур пропорциональны друг другу:

$$\Phi_B = L \cdot I \quad (10)$$

♦Коэффициент пропорциональности ***L*** между силой тока в контуре и полным магнитным потоком через контур называется **индуктивностью контура**.

Индуктивность ***L*** зависит от геометрии контура (т.е. его формы и размеров), а также от магнитных свойств (от μ) окружающей контур

среды. Если контур жесткий и поблизости от него нет ферромагнетиков, индуктивность L является постоянной величиной.

Единицей индуктивности является *Генри (Гн)*. Индуктивностью 1 Гн обладает контур, магнитный поток сквозь который при токе 1 А равен 1 Вб.

При изменении силы тока в контуре возникает э.д.с. самоиндукции

$$\mathcal{E}_{si} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d}{dt}(LI) \dots\dots\dots(11)$$

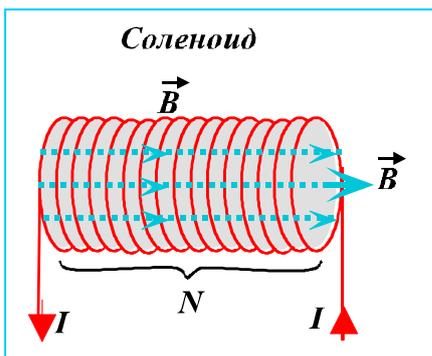
Если $L=\text{const}$ (не меняется конфигурация контура и нет ферромагнетиков), то

$$\mathcal{E}_{si} = -L \frac{dI}{dt} \quad (12)$$

Знак минус показывает, что \mathcal{E}_{si} всегда направлена так, чтобы препятствовать изменению силы тока – в соответствии с правилом Ленца. Эта э.д.с. стремится сохранить ток неизменным: она противодействует току, когда он увеличивается, и поддерживает ток, когда он уменьшается. В явлениях самоиндукции ток обладает «инерцией», потому что эффекты индукции стремятся сохранить магнитный поток постоянным, точно так же, как механическая инерция стремится сохранить скорость тела постоянной.

Характерные проявления самоиндукции наблюдаются при замыкании и размыкании тока в цепи. При изменении собственного (основного) тока в цепи возникают ЭДС и токи самоиндукции, препятствующие этому изменению (по правилу Ленца). При включении (выключении) электрических приборов ток растет (исчезает) постепенно, а не скачком.

◆ **Индуктивность соленоида.**



По определению, магнитный поток для N витков соленоида:

$$\begin{aligned} \Phi_{si} &= NBS = (B = \mu\mu_0 nI) = \mu\mu_0 NnIS = \\ &= \left(\frac{l}{l}\right) = \mu\mu_0 \frac{N}{l} n \cdot (Sl) \cdot I = \mu\mu_0 n^2 V \cdot I \end{aligned} \quad (13)$$

Сравнивая с определением индуктивности, получаем:

$$L = \mu\mu_0 n^2 V, \quad (14)$$

где l , S , V – длина, площадь сечения и объем соленоида;
 N , n – число и плотность витков.

♦ **Энергия магнитного поля тока:**

Магнитное поле должно обладать энергией, равной работе, затраченной током на создание этого поля. Именно наличием энергии у магнитного поля объясняется физическая сущность явления ЭМИ. При выключении тока его магнитное поле исчезает. Однако согласно закону сохранения энергии, энергия магнитного поля не может исчезнуть. Она переходит в энергию тока самоиндукции, усиливающего силу выключаемого тока.

Явление ЭМИ основано на взаимных превращениях энергий электрического тока и магнитного поля. Для изменения магнитного потока на $d\Phi$ ток должен совершить работу

$$dA = I \cdot d\Phi \qquad d\Phi = LdI$$
$$A = \int_0^I LI dI = \frac{L \cdot I^2}{2} \quad (15)$$

Следовательно, энергия магнитного поля, связанного с контуром,

$$W_m = \frac{L \cdot I^2}{2} \quad (16)$$

ЗАДАНИЕ ДЛЯ ДОПУСКА:

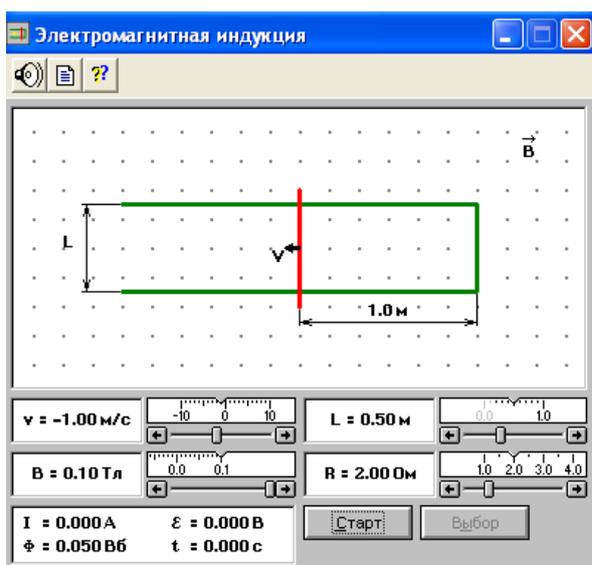
Проводящая перемычка длиной l движется со скоростью v по параллельным проводам, замкнутым с одной стороны. Система проводников расположена в однородном магнитном поле, индукция которого равна B и направлена перпендикулярно плоскости, в которой расположены проводники. Найти индукционный ток I в перемычке, если ее сопротивление R .

Задачу решить в общем виде, выразив ток I через известные величины l , v , B и R .

Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.

Приступайте к измерениям.

МЕТОДИКА и ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ.



1. Запустите программу. Выберите «Электричество и магнетизм» и «Электромагнитная индукция». Нажмите сверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения. Запустите эксперимент, щелкнув мышью по кнопке «Старт». Наблюдайте движение переключки и изменение

магнитного потока Φ (цифры внизу окна). Потренируйтесь в пошаговом выполнении эксперимента. Для этого щелкните мышью кнопку «|» в верхнем ряду кнопок. Нажмите кнопку «Старт» и затем нажимайте мышью кнопку «▶|». Для того, чтобы завершить эксперимент, нажмите кнопку «▶▶».

ТАБЛИЦА 1. Значения исходных параметров

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
v , м/с	-4	-5	-6	-7	4	5	6	7
R , Ом	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5
B , Тл	-0.1	-0.09	-0.08	-0.07	-0.06	-0.05	-0.04	-0.03
L , м	1,0							
Вариант	9	10	11	12	13	14	15	16
v , м/с	-4	-5	-6	-7	4	5	6	7
R , Ом	5.0	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5
B , Тл	0.1	0.09	0.08	0.07	0.06	0.05	0.04	0.03
L , м	0.7							

2. Установите значения, указанные в таблице 1 для Вашего варианта.

- L – расстояния между проводами,
- R – сопротивления переключки,
- v - скорости движения переключки
- B – величины индукции магнитного поля.

ТАБЛИЦА 2. Результаты измерений.

L=	R=	V=	B=		
	1	2	14	15
<i>t, с</i>					
<i>Φ, Вб</i>					
<i>I_{мод}</i>			<i>I_{рас}</i>		
<i>ε_{мод}</i>			<i>ε_{рас}</i>		<i>ε_{граф}</i>

3. Снимите значения магнитного потока Φ для 10 – 15 моментов времени, выполняя эксперимент пошагово. Занесите все значения в таблицу 2.

4. Запишите в таблицу 2 модельные значения индукционного тока и ЭДС индукции, показанные в нижнем окошечке.

5. По формуле, полученной в задании для допуска, рассчитайте значение индукционного тока $I_{рас}$ и тоже запишите в таблицу 2.

6. По данным таблицы 2 на миллиметровой бумаге постройте график зависимости магнитного потока Φ от времени t .

7. По углу наклона графика определите ЭДС индукции ($\epsilon_{граф}$) как

$$|\epsilon| = \frac{\Delta(\Phi)}{\Delta(t)}$$

8. Сделайте вывод.

Письменно ответьте на следующие вопросы:

1. Что называется магнитным потоком? При каких условиях магнитный поток равен нулю?

2. Сформулируйте определение явления электромагнитной индукции.

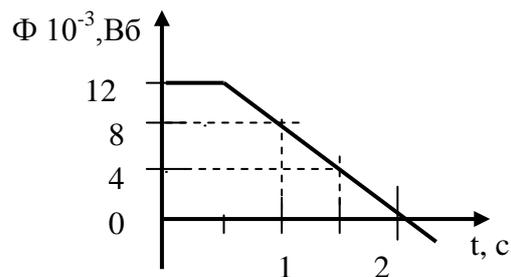
3. Запишите закон Фарадея для электромагнитной индукции. Сформулируйте правило Ленца. Какой физический закон оно выражает?

4. Сформулируйте закон электромагнитной индукции.

5. В чем разница в механизмах возникновения э.д.с. электромагнитной индукции при движении проводника в магнитном поле и при изменении со временем магнитного поля, пронизывающего проводящий контур?

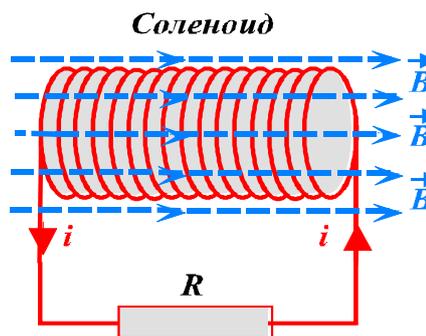
6. При каких условиях возникает ЭДС самоиндукции? Сформулируйте определение явления самоиндукции.

7. Произвольный замкнутый контур находится в однородном магнитном поле, линии индукции которого направлены перпендикулярно плоскости контура. Как надо двигать контур, чтобы магнитный поток через контур менялся?
8. Назовите способы создания переменного магнитного потока. Как изменяется со временем магнитный поток в данной работе?
9. Дайте определение индуктивности и ее единицы измерения.
10. Что происходит с энергией магнитного поля тока в проводнике при его выключении?
11. Проволочное кольцо вращается в магнитном поле вокруг оси, совпадающей с его диаметром и параллельной линиям индукции поля. Будет ли индуцироваться ток в кольце? Объясните ответ.
12. Сформулируйте правило Ленца. Какой физический закон оно выражает?
13. В чем разница в механизмах возникновения ЭДС электромагнитной индукции при движении проводника в магнитном поле и при изменении со временем магнитного поля, пронизывающего проводящий контур?
14. Чему равна скорость изменения магнитного потока сквозь контур, если ЭДС индукции, возникающая в контуре, равна 6 В?
15. На рисунке представлен график изменения со временем магнитного потока, пронизывающего некоторый контур. Чему равно среднее значение ЭДС индукции, возбуждаемой в контуре за первую секунду?
16. Что называется явлением самоиндукции? Чему равна ЭДС самоиндукции?
17. Дайте определение индуктивности и ее единицы измерения.
18. Ток в проводящем контуре индуктивностью $L=1$ Гн изменяется по закону $I = 4 - 15t$ (А). Чему равна ЭДС самоиндукции, возникающая в контуре?
19. Как нужно изменить индуктивность контура для того чтобы при неизменном значении силы тока в нем энергия магнитного поля уменьшилась в 4 раза?
20. Электрический ток 2 А создает в контуре магнитный поток $6 \cdot 10^3$ Вб. Какова индуктивность контура?



ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ:

Замкнутая цепь, состоящая из соленоида (прямая катушка) и активного сопротивления R , находится в однородном магнитном поле. Индукция магнитного поля B возрастает со временем t по линейному закону $B = -a \cdot t$, где a – коэффициент. Площадь поперечного сечения соленоида (площадь витка) $S = 10^{-3} \text{ м}^2$, плотность намотки витков (количество витков на единице длины) $n = 10^4 \text{ м}^{-1}$. Длина соленоида $l = 10 \text{ см}$.



Сопротивление цепи R возьмите из таблицы 2 для Вашего варианта.

ТАБЛИЦА 3. Числовые значения коэффициента a :

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$a(\text{Тл/с}) =$	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	12

ОПРЕДЕЛИТЬ:

- 1) зависимость магнитного потока, проходящего через соленоид, от времени $\Phi = \Phi(t)$.
- 2) ЭДС индукции, возникающую в контуре.
- 3) силу индукционного тока.
- 4) мощность P , которая выделяется в цепи.
- 5) индуктивность соленоида L .
- 6) энергию W магнитного поля тока соленоида.

Лабораторная работа № 4.4
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

Определение добротности колебательного контура.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:

♦ **Колебаниями** называются движения или процессы, которые повторяются во времени.

Колебания могут иметь различную физическую природу. Например, механические колебания или электромагнитные. Но различные по природе колебательные процессы описываются одинаковыми уравнениями.

♦ **Колебательная система** - система, совершающая колебания.

♦ **Свободными (или собственными) колебаниями** называются колебания, которые совершаются за счет первоначально сообщенной энергии без дальнейшего внешнего воздействия на колебательную систему.

♦ **Вынужденными колебаниями** называются колебания, которые совершаются под действием переменной внешней силы.

♦ **Гармоническими колебаниями** – называются колебания, при которых физическая величина $\xi(t)$ изменяется во времени по закону синуса или косинуса

$$\xi(t) = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad \text{или} \quad \xi(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$$

♦ **Основные характеристики колебаний**

- Период колебаний T (с) – время одного колебания.
- Частота ν ($\text{с}^{-1} = \text{Гц}$) – число полных колебаний в единицу времени

$$\nu = \frac{1}{T}.$$

- Циклическая (круговая) частота ω (рад/с) – количество полных колебаний за 2π секунд.

Связь частоты и периода колебаний: $\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$.

- Амплитуда колебаний A — максимальное значение колеблющейся величины $\xi(t)$.
- Фаза колебаний $\varphi = (\omega t + \varphi_0)$ определяет положение колеблющейся величины в момент времени t .
- Начальная фаза колебаний φ_0 определяет начальное положение колеблющейся величины в момент времени $t=0$.

♦ **Скорость и ускорение** гармонически колеблющейся величины $\xi(t)$ также совершают гармонические колебания с той же самой частотой (рис.12). Пусть какая-то физическая величина $\xi(t)$ совершает гармонические колебания по закону косинуса

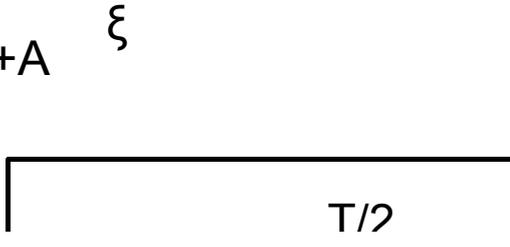
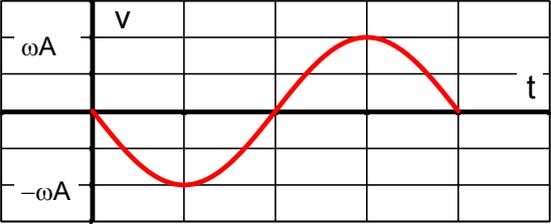
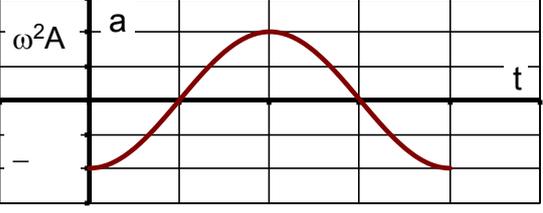
	$\xi(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (1)$
	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Скорость</i> – это первая производная от $\xi(t)$ по времени: $V(t) = \frac{d\xi(t)}{dt} = -A\omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (2)$
	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Ускорение</i> – это вторая производная от $\xi(t)$ по времени: $a(t) = \frac{d^2\xi(t)}{dt^2} = -A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (3)$

Рисунок 12

♦ **Дифференциальное уравнение гармонических колебаний.**

Из (1) и (3) видно, что ускорение гармонически колеблющейся величины пропорционально самой величине

$$a(t) = -\omega_0^2 \xi(t).$$

Уравнение

$$\frac{d^2\xi}{dt^2} + \omega_0^2 \xi = 0 \quad (4)$$

называется **дифференциальным уравнением гармонических колебаний**, поскольку его решениями являются

$$\xi(t) = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad \text{или} \quad \xi(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0).$$

Любые колебания, подчиняющиеся дифференциальному уравнению (4), являются гармоническими с собственной циклической частотой

ω_0 . Системы, совершающие колебания, описываемые уравнением (4), называются гармоническими осцилляторами.

ЗАТУХАЮЩИЕ КОЛЕБАНИЯ

♦ Затуханием колебаний называется постепенное ослабление колебаний, вызванное потерей энергии колебательной системой. Если убыль энергии не восполняется за счет работы внешних сил, то колебания будут затухать и называются затухающие колебания. Потери энергии колебаний в механических колебательных системах происходят из-за трения; в электрических – из-за наличия активного сопротивления проводников.

♦ Дифференциальное уравнение затухающих колебаний.

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0 \quad (5)$$

$x(t)$ – смещение материальной точки.

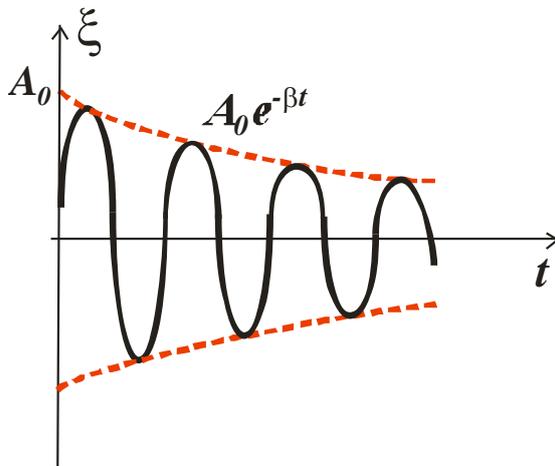
β - коэффициент затухания.

Для механических систем $\beta = \frac{r}{2m}$,

где r - коэффициент сопротивления среды.

ω_0 – собственная частота свободных незатухающих колебаний (при $\beta = 0$).

При не слишком большом затухании ($\beta < \omega_0$) решением дифференциального уравнения (5) является гармоническая функция



$$\xi(t) = \underbrace{A_0 e^{-\beta t}}_{\substack{\text{амплитуда} \\ \text{затухающих} \\ \text{колебаний}}} \cos(\omega t + \varphi_0)$$

Из-за потерь энергии амплитуда затухающих колебаний со временем уменьшается (рис.13)

Рисунок 13

$$A(t) = A_0 e^{-\beta t}.$$

$\omega^2 = \omega_0^2 - \beta^2$ - квадрат частоты затухающих колебаний;

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}} - \text{период затухающих колебаний.}$$

♦ Характеристики затухания.

• $\tau = \frac{1}{\beta}$ - *время затухания*: время, за которое амплитуда колебаний уменьшается в e раз.

• $N = \frac{1}{\beta T}$ - *число колебаний*, после которых амплитуда колебаний уменьшается в e раз.

• $\frac{A(t)}{A(t+T)} = e^{\beta T}$ - *декремент затухания*: отношение значений амплитуд, соответствующих моментам времени, отличающимся на период.

• $\lambda = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} = \beta T$ - *логарифмический декремент затухания*: натуральный логарифм отношения амплитуд за период.

• $Q = \frac{\pi}{\lambda} = \pi N$ - *добротность* - безразмерная физическая величина, равная произведению величины (2π) на отношение энергии $W(t)$ системы в произвольный момент времени к убыли энергии за один период затухающих колебаний. Добротность показывает, сколько энергии теряется в колебательной системе за период.

$$Q = 2\pi \frac{W(t)}{W(t) - W(t+T)} \left(\frac{\text{энергия, запасенная в системе}}{\text{убыль энергии за период}} \right).$$

Чем больше добротность колебательной системы, тем меньше затухание, тем дольше будет длиться периодический процесс в такой системе.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

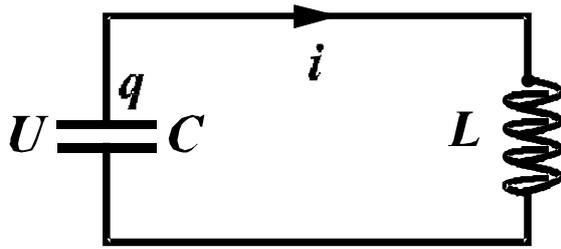


Рисунок 14

Электромагнитные колебания – это колебания электромагнитного поля. Колеблущейся величиной $\xi(t)$ является величина заряда $q(t)$.

♦ Идеальный колебательный контур - электрическая цепь, состоящая из последовательно соединенных конденсатора с емкостью C и катушки с

индуктивностью L (рис. 14). При электромагнитных колебаниях, происходят периодические изменения электрических и магнитных величин: заряда q , напряжения U , электрического тока i , напряженности электрического поля E , индукции магнитного поля B .

Для возникновения свободных колебаний систему необходимо вывести из положения равновесия. Для этого нужно зарядить конденсатор. На обкладках конденсатора появятся электрический заряд q , а между обкладками – напряжение U . Под действием напряжения заряды начинают переходить с одной обкладки на другую – в цепи пойдет ток i . По закону Ома для участка цепи, содержащей ЭДС

$$iR = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon \quad (6)$$

ЭДС, действующая в контуре, есть ЭДС самоиндукции

$$\varepsilon = \varepsilon_s = -L \frac{di}{dt}$$

а $\varphi_1 - \varphi_2 = U = \frac{q}{C}$ - напряжение на конденсаторе. При увеличении

тока, заряд конденсатора уменьшается, поэтому $i = -\frac{dq}{dt}$. Собирая

все вместе в уравнение (6) и учитывая, что в идеальном колебательном контуре сопротивление $R = 0$, получим **дифференциальное уравнение свободных электромагнитных колебаний**

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{1}{LC}q = 0 \quad (7)$$

Решением этого уравнения является функция синуса или косинуса:

$$q(t) = q_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (8)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ - собственная частота колебаний в контуре.} \quad (9)$$

Сила тока
$$i = \frac{dq}{dt} = -\omega_0 q_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (10)$$

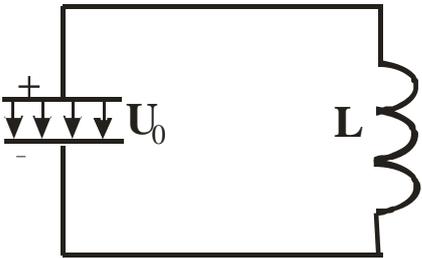
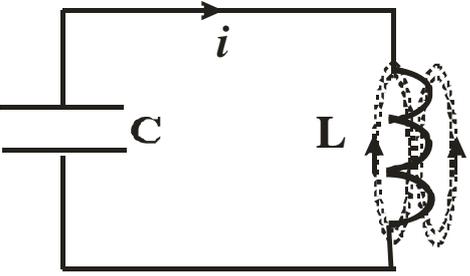
и напряжение на обкладках конденсатора

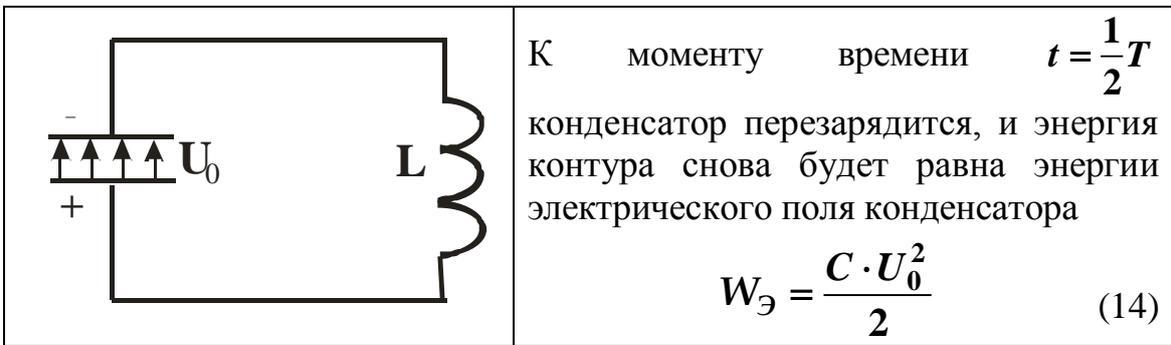
$$U = \frac{q}{C} = \frac{q_0}{C} \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (11)$$

также изменяются по гармоническому закону.

♦ Превращение энергии при свободных электромагнитных колебаниях.

При электромагнитных колебаниях происходит попеременное превращение энергии электрического поля в энергию магнитного поля.

	<p>В начальный момент времени конденсатор заряжен зарядом q. Вся энергия контура W сосредоточена в энергии электрического поля конденсатора</p> $W_{\text{Э}} = \frac{C \cdot U_0^2}{2}. \quad (12)$
<p>Затем конденсатор начнет разряжаться и в контуре потечет возрастающий электрический ток. Энергия электрического поля начнет уменьшаться, а энергия магнитного поля катушки возрастать.</p>	
	<p>В момент времени $t = \frac{1}{4}T$ (T – период колебаний) конденсатор полностью разрядится, энергия электрического поля станет равной нулю. Вся энергия контура будет сосредоточена в энергии магнитного поля катушки</p> $W_{\text{М}} = \frac{L \cdot i^2}{2} \quad (13)$
<p>Теперь ток в контуре начнет ослабевать, и магнитное поле катушки будет уменьшаться. При этом возникает ток самоиндукции, который, поддерживая убывающий ток, перезаряжает конденсатор. Энергия магнитного поля переходит в энергию электрического поля.</p>	



Затем все процессы в контуре будут протекать в обратном направлении. Поскольку в идеальном контуре потерь энергии нет ($R = 0$), то полная энергия контура сохраняется

$$W = W_{\text{Э}} + W_M = \text{const.}$$

Для электрических систем
$$\beta = \frac{R}{2L}, \quad (15)$$

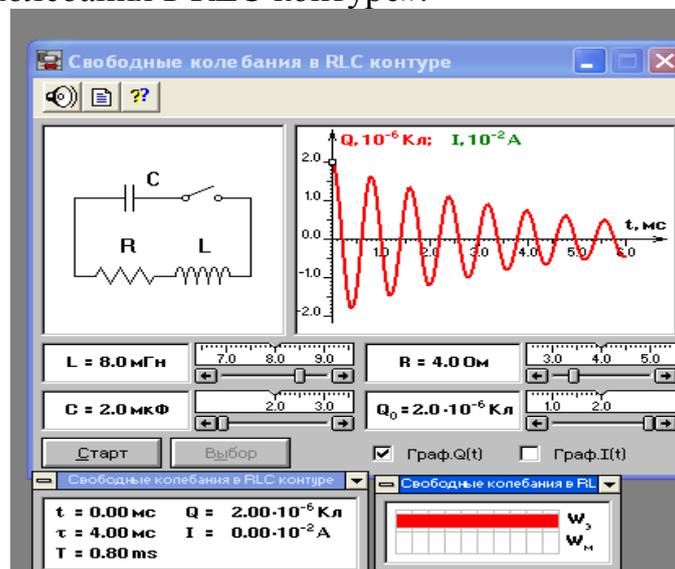
где R – активное сопротивление.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ ДОПУСКА.

1. Получите дифференциальное уравнение свободных затухающих колебаний в колебательном контуре.
2. Запишите формулы, определяющие собственную частоту и период колебаний для колебательного контура.
3. Напишите, чему равны амплитуды колебаний тока и напряжения в контуре.
4. Выпишите формулы для времени затухания колебаний, логарифмического декремента затухания и добротности контура.

МЕТОДИКА и ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

1. Откройте программу, выберите «Электричество и магнетизм» и «Свободные колебания в RLC контуре».



2. Внимательно рассмотрите рисунок. Найдите регуляторы с движками, задающие значения заряда, емкости, индуктивности, сопротивления.

ТАБЛИЦА 1. Тестирование модели

КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ КОНТУР ($q_0=2\text{мкКл}$, $C=4\text{мкФ}$, $L=10\text{мГн}$, $R=1\text{ Ом}$)							
	ω , рад/с	T , с	I_{max} , А	β , с ⁻¹	τ , с	λ	Q
Расчет.							
Модел.							

3. **Протестируйте модель.** Установите значение заряда 2мкКл , емкости конденсатора 4мкФ , индуктивности катушки 10мГн , сопротивления 1 Ом . Рассчитайте собственную частоту и период колебаний колебательного контура. Сравните рассчитанный период с модельным значением, показанным в нижнем окошечке. Запишите все значения в таблицу 1.

4. Рассчитайте амплитуду колебаний тока в контуре. Отметьте галочкой график тока. Нажав на кнопку «СТОП», остановите процесс в момент, когда ток достигнет своего максимального значения. Сравните модельное значение максимального тока с расчетным. Запишите эти значения в таблицу 1.

5. Рассчитайте характеристики затухания колебаний в контуре:

- коэффициент затухания;
- время затухания;
- логарифмический декремент затухания;
- добротность контура.

Все значения занесите в таблицу 1. Сравните расчетное время затухания с модельным.

Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.

Приступайте к измерениям

ТАБЛИЦА 2. Значения емкости и индуктивности.

<i>Номер варианта</i>	<i>L, мГн</i>	<i>C, мкФ</i>	<i>Номер варианта</i>	<i>L, мГн</i>	<i>C, мкФ</i>
1	10	2	9	5.8	5.6
2	8	3	10	6.5	6
3	5	4	11	7.5	4.2
4	5.5	5	12	8.5	3.5
5	9.5	2.2	13	9	2.5
6	7.3	3.4	14	8.3	3.7
7	6	4.5	15	7.1	4.3
8	6.2	5.8	16	7.8	5.2

ЗАДАНИЕ 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОБРОТНОСТИ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО КОНТУРА.

1. Активизируйте окно «Свободные колебания в RLC контуре». Установите значение индуктивности и емкости согласно Вашему варианту (таблица 2). Величину заряда на конденсаторе установите произвольно.
2. Установите сопротивление резистора $R = 1 \text{ Ом}$. Нажав кнопку «Старт», наблюдайте график зависимости заряда конденсатора от времени. Измерьте линейкой значения первых четырех - пяти амплитуд и запишите их в таблицу 3. В последнюю строчку таблицы 3 запишите время t , при котором измерена соответствующая амплитуда.
3. Меняя сопротивление R , повторите измерения амплитуд и заполните таблицу 3.

ТАБЛИЦА 3. Результаты измерений при $C = \underline{\hspace{1cm}}$ мкф, $L = \underline{\hspace{1cm}}$ мГн, $T = \underline{\hspace{1cm}}$ мс.

R Ом	A₁ мм	A₂ мм	A₃ мм	A₄ мм	A₅ мм	τ, мс	β, с⁻¹	λ	Q
1									
2									
3									
4									
5									
6									
t, мс									

4. Рассчитайте значения периода колебаний и запишите в заголовке таблицы 3.

5. Постройте на одном чертеже графики зависимостей амплитуды колебания A от времени t (6 линий, соответствующих разным R).

6. Для каждого графика соедините прямой линией значения первых двух амплитуд A_1 и A_2 . Продолжите прямую до пересечения с осью абсцисс. Точка пересечения определяет величину времени затухания τ . Запишите это значение в таблицу 3. Рассчитайте величины коэффициента затухания

$$\beta = 1/\tau \quad \text{и} \quad \beta = R/2L.$$

Запишите их в таблицу 3.

7. Для каждого значения сопротивления вычислите логарифмический декремент затухания

$$\lambda = T/\tau \quad \text{и} \quad \lambda = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)}$$

и добротность контура. Запишите в таблицу 3.

8. Сделайте вывод по результатам работы.

Письменно ответьте на следующие вопросы.

1. Что такое колебательный контур? Какая физическая величина испытывает колебания в колебательном контуре?
2. Запишите дифференциальное уравнение гармонических колебаний для колебательного контура.
3. Сравните колебательный контур с колебательной системой - груз на пружинке. Установите аналогию между величинами, характеризующими эти колебания.
4. Опишите превращения энергии при электрических гармонических колебаниях в контуре.
5. Какие колебания называются затухающими?
6. Запишите дифференциальное уравнение свободных затухающих колебаний. Изобразите график затухающего колебания.
7. Приведите схему колебательного контура для затухающих электромагнитных колебаний
8. Перечислите и дайте определения характеристик затухания.
9. Что определяет добротность?

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ.

Колебательный контур состоит из катушки индуктивностью L и конденсатора емкостью $C=10^{-5}\Phi$. Максимальное напряжение конденсатора U_0 . Числовые значения L и U_0 задаются для каждого варианта в таблице 4:

ТАБЛИЦА 4. Числовые значения индуктивности и напряжения.

<i>Вариант</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$L(\cdot 10^{-3} \text{ Гн})$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	3,0
$U_0 \text{ (В)}$	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25

- 1) Определить период и циклическую частоту колебаний тока, заряда и напряжения.
- 2) Определить максимальные значения силы тока и заряда.
- 3) Определить максимальную энергию электрического поля конденсатора и максимальную энергию магнитного поля катушки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трофимова, Т.И. **Курс физики**. Учеб. пособие для ВУЗов / Т.И. Трофимова.: Издательский центр «Академия», 2007. – 560с.
2. Трофимова, Т.И. **Физика в таблицах и формулах**. Учеб. пособие для студентов ВУЗов / Т.И. Трофимова. М.: Дрофа, 2009. – 432с.
3. Грабовский, Р.И. **Курс физики**. Учебники для вузов / Р.И. Грабовский. СПб.: Издательство «Лань», 2004. – 608с.
4. Детлаф, А.А. **Курс физики**. Учеб. пособие для ВТУЗов /А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – 3-е изд. , испр. и доп. – М.: Высшая школа, 2003. – 718с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

НЕКОТОРЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ КОНСТАНТЫ

Название	Символ	Значение	Размерность
Гравитационная постоянная	G	$6.67 \cdot 10^{-11}$	$\text{Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-2}$
Ускорение свободного падения на поверхности Земли	g_0	9.81	$\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$
Скорость света в вакууме	c	$3 \cdot 10^8$	$\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$
Постоянная Авогадро	N_A	$6.02 \cdot 10^{23}$	моль^{-1}
Универсальная газовая постоянная	R	8.31	$\text{Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$
Постоянная Больцмана	k	$1.38 \cdot 10^{-23}$	$\text{Дж} \cdot \text{К}^{-1}$
Элементарный заряд	e	$1.6 \cdot 10^{-19}$	Кл
Масса электрона	m_e	$9.11 \cdot 10^{-31}$	кг
Электрическая постоянная	ϵ_0	$8.85 \cdot 10^{-12}$	$\text{Ф} \cdot \text{м}^{-1}$
Магнитная постоянная	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$	$\text{Гн} \cdot \text{м}^{-1}$
Постоянная Планка	h	$6.62 \cdot 10^{-34}$	Дж·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}

ГРЕЧЕСКИЙ АЛФАВИТ

α - альфа, β - бета, γ - гамма, Δ, δ - дельта, ϵ - эпсилон
 ζ - дзета, η - эта, θ - тэта, ι - нота, κ - каппа,
 λ - лямбда, μ - мю, ν - ню, ξ - кси, \omicron - омикрон,
 π - пи, ρ - ро, Σ, σ - сигма, τ - тау, ϕ - фи,
 χ - хи, $\Psi \psi$ - пси, Ω, ω - омега .

Учебно-методическое издание

Людмила Александровна Кузовникова
Елена Александровна Денисова
Наталья Геннадьевна Замкова

ФИЗИКА
Виртуальный лабораторный практикум
учебное пособие
Часть 2. Раздел 4
МАГНЕТИЗМ

Подписано в печать 1.12.2011 г. .

Формат бумаги 60 × 84/16

1,39 авт.л.; 3,06 печ.л.

200 экз.

План издания 2011г. №^{п/п} 68_2

Отпечатано в КриЖТ ИрГУПС
Красноярск, ул.Ладо Кецховели, 89