

Ю. В. Тихомиров

# **ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ**

по курсу физики

**С КОМПЬЮТЕРНЫМИ МОДЕЛЯМИ**  
(электричество и магнетизм. оптика)

*для студентов всех специальностей  
всех форм обучения*

**МОСКВА - 2010**

Ю В.Тихомиров

Лабораторные работы по курсу физики с компьютерными моделями  
(Электричество и магнетизм. Оптика).

Учебное пособие для студентов высших технических учебных заведений  
дневной, вечерней и заочной (дистанционной) форм обучения. М., 2010. 62 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ДОПУСК К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ.....	5
ОФОРМЛЕНИЕ КОНСПЕКТА ДЛЯ ДОПУСКА К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ.....	5
ОФОРМЛЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ К ЗАЧЕТУ.....	6
РАЗДЕЛ 2. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ. ОПТИКА.....	8
2_1. ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННОЙ ЧАСТИЦЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ.....	8
2_6. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ТОЧЕЧНЫХ ЗАРЯДОВ.....	13
2_2. ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	20
2_7. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ.....	25
2_8. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ.....	32
2_3. СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ В КОНТУРЕ.....	38
2_9. ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ В RLC-КОНТУРЕ.....	44
2_4. ДИФРАКЦИЯ И ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ.....	51
2_5. ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЕТКА.....	56
ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ.....	60
НЕКОТОРЫЕ ПОЛЕЗНЫЕ СВЕДЕНИЯ.....	62

## ВВЕДЕНИЕ

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

Для начала работы необходимо дважды щелкнуть левой кнопкой мыши, когда ее маркер расположен над эмблемой сборника компьютерных моделей. После этого появится начальная картинка, имеющая следующий вид:

**Список моделей курса**

**Глава 1. Электродинамика**

- 1.1. [Взаимодействие точечных зарядов](#)
- 1.2. [Электрическое поле точечных зарядов](#)
- 1.3. [Движение заряда в электрическом поле](#)
- 1.4. [Поле плоского конденсатора](#)
- 1.5. [Цепи постоянного тока](#)
- 1.6. [Конденсаторы в цепях постоянного тока](#)
- 1.7. [Взаимодействие параллельных токов](#)
- 1.8. [Рамка с током в магнитном поле](#)
- 1.9. [Магнитное поле кругового витка с током](#)
- 1.10. [Магнитное поле прямого тока](#)
- 1.11. [Магнитное поле соленоида](#)
- 1.12. [Движение заряда в магнитном поле](#)
- 1.13. [Масс-спектрометр](#)
- 1.14. [Селектор скоростей](#)
- 1.15. [Электромагнитная индукция](#)
- 1.16. [Опыты Фарадея](#)
- 1.17. [Генератор переменного тока](#)
- 1.18. [Конструктор гальванических элементов](#)
- 1.19. [Гальванический элемент](#)

**Глава 2. Электромагнитные колебания и волны**

- 2.1. [RC контур](#)
- 2.2. [RL контур](#)
- 2.3. [Свободные колебания в RLC контуре](#)
- 2.4. [Вынужденные колебания в RLC контуре](#)

$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{F}$

$E_0 = mc^2$

$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$

$C = q/U$

$I = \frac{E}{R+r}$

$T = 2\pi\sqrt{LC}$

$\Delta Q = I^2 R \Delta t$

$\Delta U = E \Delta x$

$F = q_0 v \sin \alpha$

$W_{in} = \frac{LI^2}{2}$

$E = Lv$

Чтобы просмотреть дальнейшие пункты содержания данного раздела, надо щелкать левой кнопкой мыши, установив ее маркер на кнопку со стрелкой вниз, расположенную в правом нижнем углу внутреннего окна.

Прочитав надписи во внутреннем окне, установите маркер мыши над названием требуемой компьютерной модели и дважды быстро нажмите левую кнопку мыши. Перемещать окна можно, зацепив мышью заголовок окна (имеющий синий фон). Для закрытия окна надо нажать мышью кнопку с крестом в правом верхнем углу данного окна.

## ДОПУСК К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Проводится преподавателем побригадно с персональным опросом каждого студента. Для допуска:

- каждый студент предварительно оформляет свой персональный конспект данной ЛР (см. соответствующие требования);
- преподаватель индивидуально проверяет оформление конспекта и задает вопросы по теории, методике измерений, установке и обработке результатов;
- студент отвечает на заданные вопросы (письменно в черновике конспекта или устно);
- преподаватель допускает студента к работе и ставит свою подпись в конспекте студента (графа ДОПУСК в табличке на обложке).

## ОФОРМЛЕНИЕ КОНСПЕКТА ДЛЯ ДОПУСКА К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Конспект для допуска к ЛР готовится заранее на двойных листах из школьной тетради в клетку (4-5 двойных листов в зависимости от почерка).

Первая страница (обложка):

Допуск	Измерения	Установка	Зачет

Лабораторная работа N\_\_  
Название:

Выполнил:  
студент группы \_\_\_\_\_  
ФИО \_\_\_\_\_  
Дата выполнения: \_\_\_\_\_  
Дата сдачи: \_\_\_\_\_

Следующие страницы:

<p><b>ЧЕРНОВИК</b></p> <p>(здесь и далее на этой стороне должны быть представлены все расчеты, включая расчетные формулы и подстановку числовых значений)</p>	<p><u>Цель работы:</u> (переписать полностью из описания).</p> <p><u>Краткая теория</u> (выписать основные формулы и пояснить каждый символ, входящий в формулу).</p> <p><u>Экспериментальная установка</u> (нарисовать чертеж и написать наименование деталей).</p> <p><u>Таблицы</u> (состав таблиц и их количество определить самостоятельно в соответствии с методикой измерений и обработкой их результатов).</p> <p><u>Оформление отчета</u> (переписать полностью из описания). Этот раздел в описании может иметь и другое название, например, «Обработка результатов и оформление отчета».</p>
---	---

## ОФОРМЛЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ К ЗАЧЕТУ

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

1. Выполнение всех **пунктов** раздела описания «Оформление отчета» (в черновике представлены все расчеты требуемых величин, заполнены чернилами все таблицы, построены все графики).
2. **Графики** должны удовлетворять всем требованиям, приведенным ниже.
3. Для всех величин в таблицах должна быть записана соответствующая единица измерения.
4. Записаны **выводы** по каждому графику (см. ниже шаблон).
5. Выписан **ответ** по установленной форме (см. ниже шаблон).
6. Записаны **выводы** по ответу (см. ниже шаблон).

### **ГРАФИК (требования):**

- на миллиметровке или листе в клетку, размер не менее 1/2 листа,
- на графике: оси декартовой системы, на концах осей - стрелки, символы характеристик, единицы измерения,  $10^N$ ,
- на каждой оси - **РАВНОМЕРНЫЙ МАСШТАБ** (риски через равные промежутки, числа через равное количество рисок),
- под графиком - полное название графика **СЛОВАМИ**,
- на графике - экспериментальные и теоретические точки (без чисел) ярко,
- форма графика соответствует теоретической зависимости (не ломаная).

### **ВЫВОД по ГРАФИКУ (шаблон):**

Полученный экспериментально график зависимости \_\_\_\_\_  
название функции словами  
от \_\_\_\_\_ имеет вид (прямой, проходящей через начало координат,  
название аргумента словами  
параболы, гиперболы, плавной кривой) и качественно совпадает с теоретической зависимостью данных характеристик, имеющей вид \_\_\_\_\_.  
формула

**ОТВЕТ:** По результатам измерений и расчетов получено значение \_\_\_\_\_,  
название физической характеристики равно \_\_\_\_\_ = ( \_\_\_\_\_  $\pm$  \_\_\_\_\_ )  $\cdot 10$  — \_\_\_\_\_.  
символ среднее ошибка степень един.измер.

### **ВЫВОД по ОТВЕТУ (шаблон):**

Полученное экспериментально значение \_\_\_\_\_,  
полное название характеристики словами  
равное \_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_, с точностью до ошибки измерений,  
число единица измерения  
составляющей \_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_, (совпадает, не совпадает) с (табличным,  
число единица измерения  
теоретическим) значением данной величины, равным \_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_.  
число единица измерения

## РАЗДЕЛ 2. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ. ОПТИКА

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

#### 2\_1. ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННОЙ ЧАСТИЦЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Ознакомьтесь с теорией в конспекте и учебнике [1,2]. Запустите программу компьютерного моделирования. Выберите «Глава 1. Электродинамика» и «Модель 1.2. Движение заряда в электрическом поле». Прочитайте краткие теоретические сведения. Оформите конспект.

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- Знакомство с процессом движения заряда в однородном электрическом поле и его моделированием.
- Экспериментальное исследование закономерностей движения точечного заряда в однородном электрическом поле.
- Экспериментальное определение величины удельного заряда частицы.

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Движение заряженных частиц в электрическом поле широко используется в современных электронных приборах, в частности, в электронно-лучевых трубках с электростатической системой отклонения электронного пучка.

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЗАРЯД** есть величина, характеризующая способность объекта создавать электрическое поле и взаимодействовать с электрическим полем.

**ТОЧЕЧНЫЙ ЗАРЯД** – это абстрактный объект (модель), имеющий вид материальной точки, несущей электрический заряд (заряженная МТ).

**ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ** – это то, что существует в области пространства, в которой на заряженный объект действует сила, называемая электрической.

**ОСНОВНЫМИ СВОЙСТВАМИ** заряда являются:

- аддитивность (суммируемость);
- инвариантность (одинаковость во всех инерциальных системах отсчета);
- дискретность (наличие элементарного заряда, обозначаемого  $e$ , и кратность любого заряда этому элементарному:  $q = Ne$ , где  $N$  - любое целое положительное или отрицательное число);
- подчинение закону сохранения заряда (суммарный заряд электрически изолированной системы, через границы которой не могут проникать заряженные частицы, сохраняется);
- наличие положительных и отрицательных зарядов (заряд – величина алге-

браическая).

**ЗАКОН КУЛОНА:** электрическая сила, действующая на точечный заряд  $q_1$ , со стороны точечного заряда  $q_2$ :

$$\vec{F}_{12} = -\frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{e}_{12},$$

где  $\vec{e}_{12}$  – единичный вектор, направленный от первого заряда  $q_1$ , находящегося в начале системы координат, ко второму  $q_2$ , имеющему радиус-вектор  $\vec{r}$ .

**НАПРЯЖЕННОСТЬЮ** называется векторная характеристика электрического поля, численно равная отношению электрической силы  $\vec{F}_{эл}$ , действующей на точечный заряд  $q$ , к величине  $q$  этого заряда:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_{эл}}{q}.$$

Если задана напряженность электрического поля, тогда сила, действующая на заряд, будет определяться формулой

$$\vec{F}_{эл} = q \vec{E}.$$

**ОДНОРОДНЫМ** называется поле, напряженность которого во всех точках одинакова как по величине, так и по направлению. Сила, действующая на заряженную частицу в однородном поле, везде одинакова, поэтому неизменным будет и ускорение частицы, определяемое вторым законом Ньютона (при малых скоростях движения  $V \ll c$ , где  $c$  – скорость света в вакууме):

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_{эл}}{m} = \frac{q}{m} \vec{E} = \text{const.}$$

Тогда

$$Y = \frac{at_{дв}^2}{2} = \frac{1}{2} \frac{q}{m} E \left( \frac{L}{V_{0x}} \right)^2,$$

$$V_Y = at_{дв} = \frac{q}{m} E \frac{L}{V_{0x}},$$

где  $t_{дв}$  – время движения частицы внутри плоского конденсатора, пластины которого создают однородное вертикальное электрическое поле,  $Y$  – смещение частицы по вертикали и  $V_Y$  – вертикальная компонента скорости в момент времени, когда частица вылетает из конденсатора,  $V_{0x}$  – проекция начальной скорости на горизонтальную ось  $X$ .

## МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

Закройте окно теории. Внимательно рассмотрите рис.1, найдите все регуляторы и другие основные элементы.

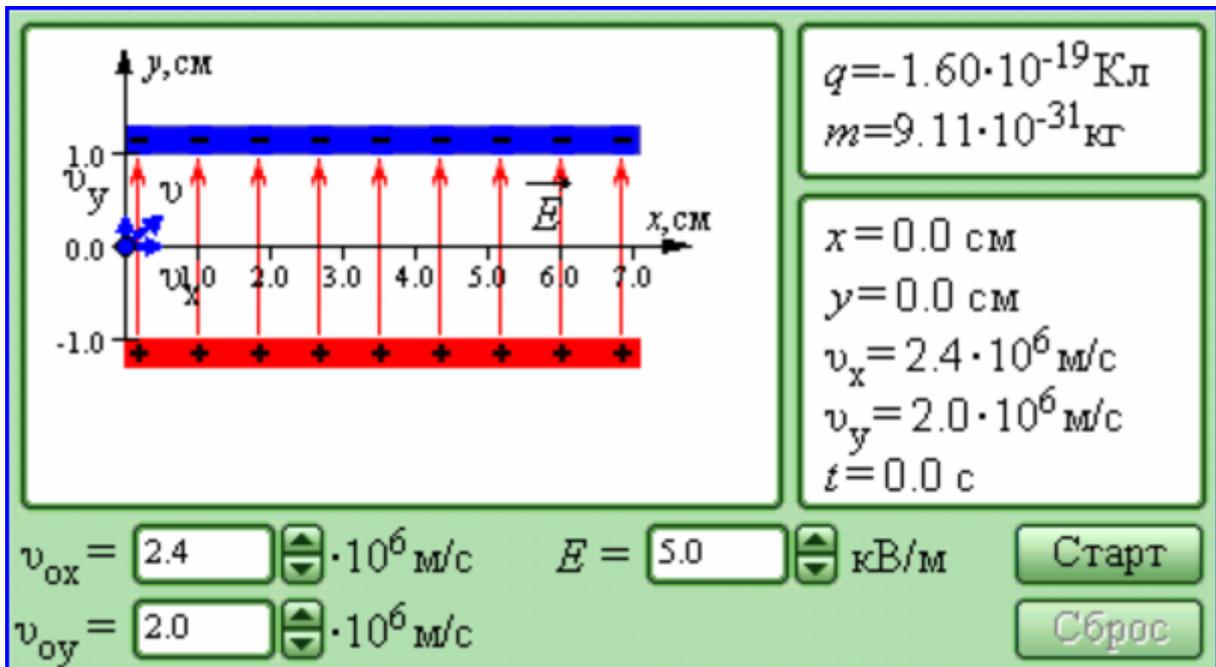


Рис.1. Модель движения заряженной частицы в плоском конденсаторе.

Зарисуйте поле эксперимента и траекторию движения частицы. Нажав кнопку «Старт», наблюдайте на экране движение частицы.

**Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.**

### ИЗМЕРЕНИЯ

1. Подведите маркер мыши к кнопке регулятора напряженности  $E$ . Щелкая левой кнопкой мыши, меняйте  $E$ . Установите числовое значение  $E$ , равное взятому из табл. 1 для вашей бригады.
2. Аналогичным способом установите  $V_{ox} = 2 \cdot 10^6 \text{ м/с}$ ,  $V_{oy} = 0$ . Нажав кнопку «Старт», наблюдайте движение частицы. Увеличивая  $V_{ox}$ , подберите минимальное значение, при котором частица вылетает из конденсатора. Определите по изображению конденсатора и запишите значение длины пластин конденсатора  $L$ .
3. Проведите измерения параметров движения частицы в момент вылета из конденсатора. Запишите числовые значения с экрана в табл. 2.
4. Повторите измерения по п. 3 еще 5 раз, каждый раз увеличивая  $V_{ox}$  на  $0,2 \cdot 10^6 \text{ м/с}$ . Результаты записывайте в табл. 2.

**ТАБЛИЦА 1 (не перерисовывать). Напряженность электрического поля**

Бригада	1	2	3	4	5	6	7	8
$E$ , В/м	100	200	300	400	-100	-200	-300	-400

**ТАБЛИЦА 2. Результаты измерений при  $E = \underline{\hspace{2cm}}$  В/м,  $L = \underline{\hspace{2cm}}$  м.**

Номер измерения	$V_{0x}$ , $10^6$ м/с	$t_{дв}$ , нс	$y$ , см	$x$ , см	$V_x$ , $10^6$ м/с	$V_y$ , $10^6$ м/с	$1/V_{0x}$ , $10^{-6}$ с/м	$(1/V_{0x})^2$ , $10^{-12}$ с/м
1								
2								
...								

### **ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА**

1. Постройте на отдельных листах графики экспериментальных зависимостей:

- вертикального смещения на вылете из конденсатора ( $Y$ ) от квадрата обратной начальной скорости  $(1/V_{0x})^2$ ,
- вертикальной составляющей скорости  $V_y$  на вылете из конденсатора от обратной начальной скорости  $(1/V_{0x})$ .

2. Для каждого графика определите по его наклону экспериментальное значение удельного заряда частицы, используя формулы: для первого

$$\frac{q}{m} = \frac{2}{EL^2} \frac{\Delta Y}{\Delta \left( \frac{1}{V_{0x}^2} \right)} \quad \text{и} \quad \frac{q}{m} = \frac{1}{EL} \frac{\Delta V_y}{\Delta \left( \frac{1}{V_{0x}} \right)} \quad \text{для второго.}$$

3. Рассчитайте среднее значение экспериментально полученного удельного заряда частицы.

4. Запишите ответ. Сформулируйте выводы по ответу и графикам.

Табличное значение удельного заряда электрона  $\frac{q_e}{m_e} = -1,76 \cdot 10^{11}$  Кл/кг.

### **Вопросы и задания для самоконтроля**

1. Дайте определение электрического заряда.
2. Выберите, к какому классу характеристик относится электрический заряд:

- характеристика движения,
  - характеристика воздействия ,
  - характеристика объекта.
3. Что такое точечный заряд?
  4. Перечислите все свойства заряда.
  5. Сформулируйте свойство дискретности заряда.
  6. Сформулируйте свойство аддитивности заряда.
  7. Сформулируйте свойство инвариантности заряда.
  8. Напишите закон Кулона для силы взаимодействия двух неподвижных зарядов.
  9. Дайте определение электростатического (электрического) поля.
  10. Дайте определение напряженности электрического поля.
  11. Напишите формулу, определяющую напряженность электрического поля.
  12. Напишите формулу, определяющую электрическую силу, действующую на точечный заряд в электрическом поле с заданной напряженностью.
  13. Напишите формулу для напряженности электрического поля точечного заряда, расположенного в начале координат.
  14. Сформулируйте принцип суперпозиции для электрического поля.
  15. Дайте определение потенциала электрического поля.
  16. Напишите формулу для потенциала электрического поля точечного заряда, расположенного в начале координат.
  17. Какое поле называется однородным?
  18. Что такое конденсатор?
  19. Напишите формулу емкости плоского конденсатора.
  20. Какое поле существует между пластинами плоского конденсатора?
  21. Какому закону подчиняется движение точечного заряда внутри плоского конденсатора?
  22. Каким будет движение заряда по горизонтали, если электрическое поле вертикально?
  23. Каким будет движение заряда по вертикали, если электрическое поле вертикально?
  24. Какую форму имеет траектория движения электрона между пластинами плоского конденсатора?
  25. Как будет двигаться заряд, если его начальная скорость вертикальна?
  26. Как будет двигаться заряд, если его начальная скорость горизонтальна?

## ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 2004. Гл.11, §§ 77-80.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М.: Высшая школа, 2000. Гл. 13

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

### 2\_6. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ТОЧЕЧНЫХ ЗАРЯДОВ

Ознакомьтесь с конспектом лекций и учебником [1,2]. Запустите программу компьютерного моделирования. Выберите «Глава 1. Электродинамика» и «1.1. Взаимодействие точечных зарядов». Прочитайте краткие теоретические сведения. Оформите конспект.

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- Знакомство с электрическим полем, создаваемым точечными источниками, и его моделированием.
- Экспериментальное подтверждение закономерностей для электрического поля точечного заряда и электрического диполя (ЭД).
- Экспериментальное определение величины электрической постоянной.

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ (ЭП) называется то, что существует в области пространства, окружающей заряженный объект, в которой на другой электрически заряженный объект действует сила, называемая электрической (кулоновской).

ИСТОЧНИКОМ ЭП являются электрически заряженные объекты.

ЗАРЯДОМ (электрическим) называется особая характеристика объекта, определяющая его способность создавать ЭП и взаимодействовать с ЭП. Часто «зарядом» называют заряженную частицу, а «точечным зарядом» – материальную точку, имеющую электрический заряд.

Основные СВОЙСТВА электрического заряда (как характеристики объекта):

- Заряд ИНВАРИАНТЕН – его величина одинакова при измерении в любой инерциальной системе отсчета.
- Заряд СОХРАНЯЕТСЯ – суммарный заряд изолированной системы тел не изменяется.
- Заряд АДДИТИВЕН – заряд системы тел равен сумме зарядов отдельных тел.
- Заряд ДИСКРЕТЕН – заряд любого тела по величине кратен минимальному заряду, который обозначается символом  $e$  и равен  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.
- Существуют заряды ДВУХ разных «сортов». Заряды одного «сорта» названы положительными, а другого «сорта» – отрицательными. Одноименные (одного «сорта») заряды отталкиваются, а разноименные – притягиваются.

Если вблизи одной заряженной частицы (заряда  $Q_1$ ), расположенной в начале координат, будет находиться вторая заряженная частица (заряд  $q_2$ ), то на второй заряд будет действовать электрическая (кулоновская) сила  $\vec{F}_{ЭЛ}$ , определяемая законом Кулона:

$$\vec{F} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2} \vec{e}_r$$

где  $\vec{r}$  – радиус-вектор точки, где расположен  $q_2$ ,  $\vec{e}_r$  – единичный радиус-вектор, направленный в точку расположения второго заряда,  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная,  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды (в вакууме  $\epsilon = 1$ ).

**НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ** – характеристика силового воздействия ЭП на заряд. Напряженность ЭП, создаваемого зарядом  $q_1$ , расположенным в начале системы координат, обозначается символом  $\vec{E}(q_1)$ , причем

$$\vec{E}(q_1) = \frac{\vec{F}}{q_2} = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{e}_r,$$

где  $\vec{F}$  – сила, действующая на заряд  $q_2$ .

После логарифмирования выражения для напряженности получим

$$\lg E = \lg \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0} - 2 \lg(r) = b_1 - 2 \lg(r). \quad (2)$$

**ЛИНИЯ ЭП** – линия, в любой точке которой вектор напряженности ЭП направлен по касательной к ней.

ЭП подчиняется **ПРИНЦИПУ СУПЕРПОЗИЦИИ**: напряженность ЭП нескольких источников является суммой векторов напряженности поля, создаваемого независимо каждым источником:

$$\vec{E}_{сум} = \sum_i \vec{E}_i.$$

**ПОТОКОМ ЭП** называется интеграл по некоторой поверхности  $S$  от скалярного произведения напряженности ЭП на элемент поверхности:

$$\Phi_E = \int_S \vec{E} d\vec{S},$$

где вектор  $d\vec{S}$  направлен по нормали к поверхности.

**ЗАКОН ГАУССА ДЛЯ ЭП**: ПОТОК ЭП через замкнутую поверхность  $S_0$  пропорционален суммарному ЗАРЯДУ, расположенному внутри объема, ограниченного поверхностью интегрирования потока  $V(S_0)$ :

$$\oint_{S_0} \vec{E} d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{j=1}^N q_j .$$

Линии напряженности электрического поля точечного заряда представляют собой прямые линии, идущие от заряда (положительного) или к заряду.

ПОТЕНЦИАЛОМ данной точки  $\vec{r}$  ЭП называется скалярная характеристика ЭП, численно равная работе сил поля по перемещению единичного положительного заряда из данной точки в другую фиксированную точку  $\vec{r}_0$ , в которой потенциал принят за 0 (например, если возможно, то в бесконечность):

$$\phi(\vec{r}) = \int_{\vec{r}}^{\vec{r}_0} \vec{E} d\vec{r} .$$

Уравнение, выражающее напряженность через потенциал:

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}}(\phi) ,$$

где оператор градиента

$$\overrightarrow{\text{grad}} = \left\{ \frac{\partial}{\partial x}; \frac{\partial}{\partial y}; \frac{\partial}{\partial z} \right\} \equiv \vec{\nabla} .$$

ДИПОЛЬ – два одинаковых по величине, но противоположных по знаку, точечных заряда  $q$ , расположенных на расстоянии  $L$  ( $L$  – плечо диполя).

ДИПОЛЬНЫЙ (ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ) МОМЕНТ – произведение  $|\vec{p}_e| = qL$ . Вектор дипольного момента  $\vec{p}_e$  направлен от отрицательного к положительному заряду.

Напряженность ЭП диполя вычисляется с использованием принципа суперпозиции для ЭП.

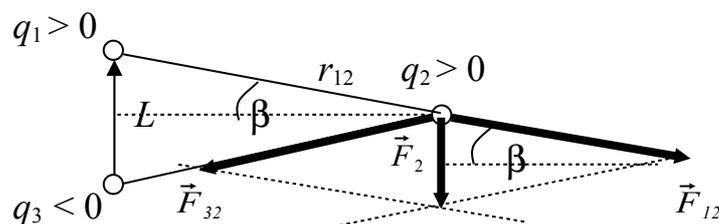


Рис.1. Схема формирования воздействия поля диполя на точечный заряд.

Как видно из рис.1,  $\sin \beta = \frac{L/2}{r_{12}}$ , а для суммарной силы получим

$$F_2 = 2F_{12} \sin(\beta) = F_{12} \frac{L}{r_{12}} .$$

На линии, проходящей через центр диполя, перпендикулярно электрическому моменту, и на большом расстоянии  $r$  от его центра:

$$\vec{E} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\vec{p}_e}{r^3} .$$

После логарифмирования выражения для напряженности получим

$$\lg E = \lg \frac{p_e}{4\pi\epsilon_0} - 3 \lg(r) = b_2 - 3 \lg(r) . \quad (2)$$

### МЕТОДИКА и ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

Рассмотрите внимательно рис.2 и зарисуйте необходимое в конспект:

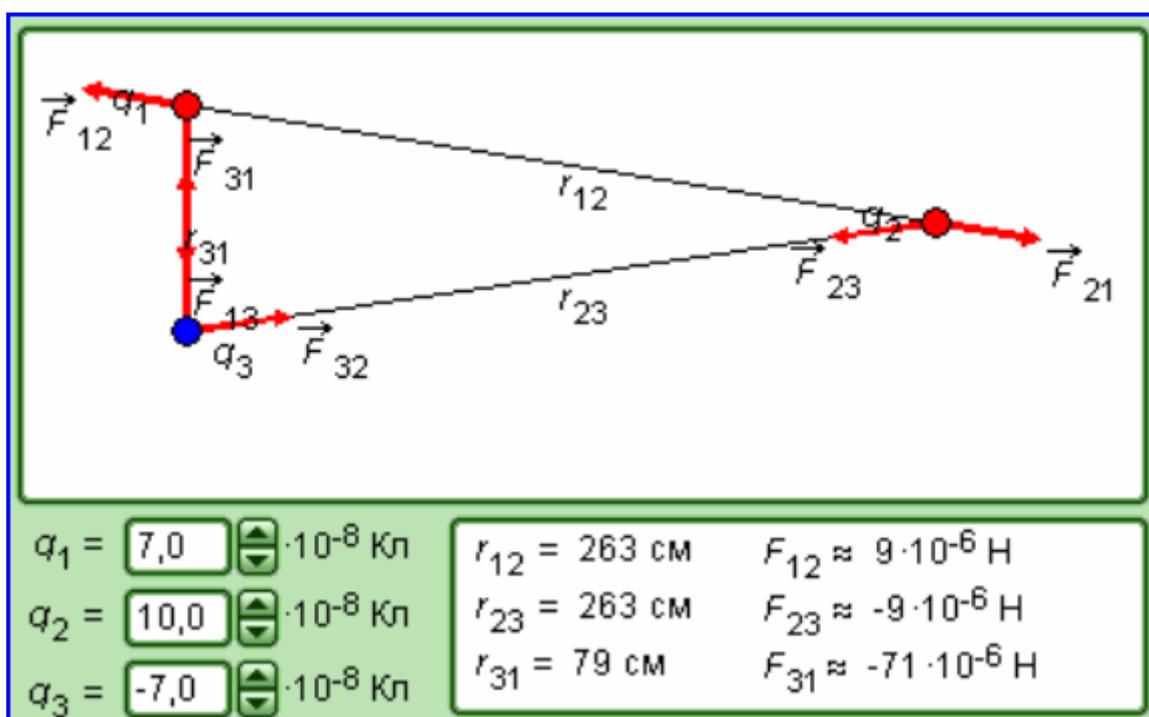


Рис.2. Модель взаимодействия диполя и точечного заряда

**Подготовьте табл. 2 и 3 (10 столбцов), используя образцы.  
Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.**

ТАБЛИЦА 1 (не перерисовывать). Значения величины заряда  $q_1$  (нКл)

Бригады	1	2	3	4	5	6	7	8
$q_1$	70	90	70	80	-70	-80	80	100
$q_1'$	100	80	90	100	-90	-100	-100	-70

ТАБЛИЦА 2. Результаты измерений и расчетов для точечного заряда  $q_1 = \underline{\hspace{1cm}}$ ,  $q_1' = \underline{\hspace{1cm}}$ , (нКл)

$r$ (м)	0.3	0.6	...	3.0
$lg(r)$				
$F_{2l}, 10^{-3}H$				
$F_{2l}', 10^{-3}H$				
$E_l, 10^4V/м$				
$E_l', 10^4V/м$				
$lgE_l$				
$lgE_l'$				

ТАБЛИЦА 3. Результаты измерений и вычислений для диполя  $p_1 = \underline{\hspace{1cm}}$ ,  $p_1' = \underline{\hspace{1cm}}$ , ( $\cdot 10^{-11}$  Кл·м)

$r$ (м)	0.3	0.6	...	3.0
$lg(r)$				
$F_{2l}, 10^{-3}H$				
$F_{2l}', 10^{-3}H$				
$E, 10^4 V/м$				
$E', 10^4 V/м$				
$lgE$				
$lgE'$				

## **ИЗМЕРЕНИЯ**

### ***ЭКСПЕРИМЕНТ 1. Исследование поля точечного заряда***

1. Зацепив мышью (нажав и удерживая левую кнопку, когда маркер мыши находится над объектом), перемещайте заряд  $q_1$  и зафиксируйте его вблизи левой границы экспериментального поля.
2. Нажимайте кнопку регулятора величины первого заряда и установите величину заряда  $q_1$ , указанную в табл. 2 для вашей бригады.
3. Заряд  $q_3$  поместите под первым, а его величину установите равной 0. Заряд  $q_2$  установите равным  $10 \cdot 10^{-8}$  Кл (100 нКл).
4. Перемещайте, зацепив мышью, заряд  $q_2$  вправо, устанавливая расстояния  $r_{12}$  до первого заряда, указанные в табл. 1.

- Измеренные в данных точках значения  $F_{21}$  и вычисленные  $E_1 = \frac{F_{21}}{q_2}$  занесите в соответствующую строку табл. 2.
- Повторите измерения для других значений заряда  $q_1$  из табл. 1, записывая в табл.2 значения  $F'_{21}$  и  $E'_1$ .

### **ЭКСПЕРИМЕНТ 2. Исследование поля диполя**

- Щелкните мышью кнопку регулятора величины второго заряда диполя ( $q_3$ ) и зафиксируйте значение заряда, указанное в табл. 2 ( $q_1$ ) для вашей бригады, изменив знак на противоположный.
- Переместите заряд  $q_3$  так, чтобы электрический момент  $\vec{p} = q_1 \cdot \vec{r}_{31}$  диполя был вертикальным, а плечо диполя ( $L = r_{31}$ ) было равно 10 см.
- Перемещайте, зацепив мышью, заряд  $q_2$  по линии, перпендикулярной оси диполя (горизонтально, при этом  $r_{12} = r_{23} = r$ ).
- На расстояниях  $r$  от оси диполя измерьте и занесите значения  $F_{21}$  и  $E = \frac{F_{21}}{q_2} \cdot \frac{L}{r_{12}}$  в табл.3.
- Повторите измерения для других значений зарядов  $q_1$  (и  $q_3$ ) из табл. 1, записывая в табл. 3 значения  $F'_{21}$  и  $E'$ .

### **ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА**

- Вычислите и запишите в табл. 2 и 3 значения всех характеристик.
- Постройте на одном листе графики (для каждого  $q_1$ ) зависимости логарифма напряженности ЭП точечного заряда (2 графика) и диполя (2 графика) от логарифма расстояния.
- По точке пересечения  $b_i$  (см. формулы 1 и 2) каждого графика с вертикальной осью определите электрическую постоянную, используя для поля точечного заряда формулу

$$\varepsilon_0 = \frac{|q_1|}{4\pi} 10^{-b_1}$$

и для поля диполя

$$\varepsilon_0 = \frac{L|q_1|}{4\pi} 10^{-b_2} .$$

- Вычислите среднее значение электрической постоянной.
- Запишите ответы и проанализируйте ответ и график.

## Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что такое электрическое поле (ЭП)?
2. Назовите источники ЭП.
3. Перечислите основные свойства заряда.
4. Поясните свойство инвариантности заряда.
5. Поясните свойство дискретности заряда.
6. Поясните свойство сохраняемости заряда.
7. Поясните свойство аддитивности заряда.
8. Какая сила действует между зарядами?
9. Дайте определение линии напряженности ЭП. Зачем их рисуют?
10. Запишите закон Кулона.
11. Что такое напряженность электрического поля?
12. Запишите формулу для напряженности поля точечного заряда.
13. Сформулируйте принцип суперпозиции для ЭП.
14. Дайте определение потока ЭП.
15. Сформулируйте и запишите закон Гаусса для ЭП.
16. Что такое электрический диполь?
17. Что такое ось диполя?
18. Что такое центр диполя?
19. Дайте определение дипольного (электрического) момента.
20. Запишите формулу для ЭП на линии, перпендикулярной оси диполя.
21. Какую форму имеет линия поля, проходящая через центр диполя?
22. Что такое потенциал ЭП и для чего он используется?
23. Напишите формулу потенциала точечного заряда.
24. Что такое градиент?
25. Как направлен вектор градиента потенциала?
26. Чему равен модуль вектора градиента потенциала?

## ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 2004. Гл.11, §§ 77-85.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М.: Высшая школа, 2000. Гл. 13.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

### 2\_2. ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Ознакомьтесь с теорией в конспекте и учебнике [1,2]. Запустите программу компьютерного моделирования. Выберите «Глава 1. Электродинамика» и «Модель 1.5. Цепи постоянного тока». Прочитайте краткие теоретические сведения. Оформите конспект.

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- Знакомство с цепями постоянного тока и их компьютерными моделями.
- Экспериментальное подтверждение законов Ома и Кирхгофа.

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

##### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ (СИЛЫ) ТОКА

$$I = \frac{dq}{dt} .$$

**ЗАКОН ОМА ДЛЯ УЧАСТКА ЦЕПИ:** величина (сила) тока, текущего по однородному (в смысле отсутствия сторонних сил) металлическому проводнику, пропорциональна падению напряжения  $U$  на проводнике

$$I = \frac{1}{R} U ,$$

где  $R$  - сопротивление проводника.

**РЕЗИСТОРОМ** называется устройство, обладающее заданным постоянным сопротивлением.

**НАПРЯЖЕНИЕ НА РЕЗИСТОРЕ:**  $U_R = IR$  .

**ЗАКОН ОМА ДЛЯ НЕОДНОРОДНОГО УЧАСТКА ЦЕПИ**

$$I = \frac{\phi_1 - \phi_2 + E_{12}}{R} ,$$

где  $\phi_1$  и  $\phi_2$  - потенциалы концов участка,  $E_{12}$  – ЭДС, действующая на данном участке цепи.

**ЗАКОН ОМА ДЛЯ ЗАМКНУТОЙ ЦЕПИ:**

$$I = \frac{E}{R} ,$$

где  $E$  - суммарная ЭДС, действующая в цепи,  $R$  – суммарное сопротивление

всей цепи.

**РАЗВЕТВЛЕННОЙ ЦЕПЬЮ** называется электрическая цепь, имеющая узлы.

**УЗЛОМ** называется точка, в которой сходится более чем два проводника. Ток, текущий к узлу, принято считать положительным, а ток, текущий от узла, считается отрицательным.

**ПЕРВОЕ ПРАВИЛО КИРХГОФА:** алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю:

$$\sum I_k = 0.$$

**ВТОРОЕ ПРАВИЛО КИРХГОФА:** в каждом из замкнутых контуров, которые можно мысленно выделить в данной разветвленной цепи, алгебраическая сумма падений напряжения равна алгебраической сумме ЭДС:

$$\sum I_k R_k = \sum E_k .$$

При анализе разветвленной цепи следует обозначать с одним индексом ток, протекающий по всем последовательно соединенным элементам от одного узла до другого. Направление каждого тока выбирается произвольно.

При составлении уравнений второго правила Кирхгофа токам и ЭДС нужно приписывать знаки в соответствии с выбранным (как вам удобно) **НАПРАВЛЕНИЕМ ОБХОДА**:

- ток принято считать положительным, если он совпадает с направлением обхода, и отрицательным, если он направлен против этого направления;
- ЭДС считается положительной, если ее действие (создаваемый ею ток) совпадает с направлением обхода.

**КОЛИЧЕСТВО УРАВНЕНИЙ** первого правила Кирхгофа должно быть на одно меньше количества узлов в данной цепи. Количество независимых уравнений второго правила Кирхгофа должно быть таким, чтобы общее количество уравнений оказалось равным количеству различных токов. Каждый новый контур при этом должен содержать хотя бы один участок цепи, не вошедший в уже рассмотренные контуры.

## **МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ**

В данной лабораторной работе исследуется модель (рис.1) простейшей разветвленной электрической цепи, состоящей из трех источников ЭДС, подключенных параллельно к одному резистору (нагрузке).

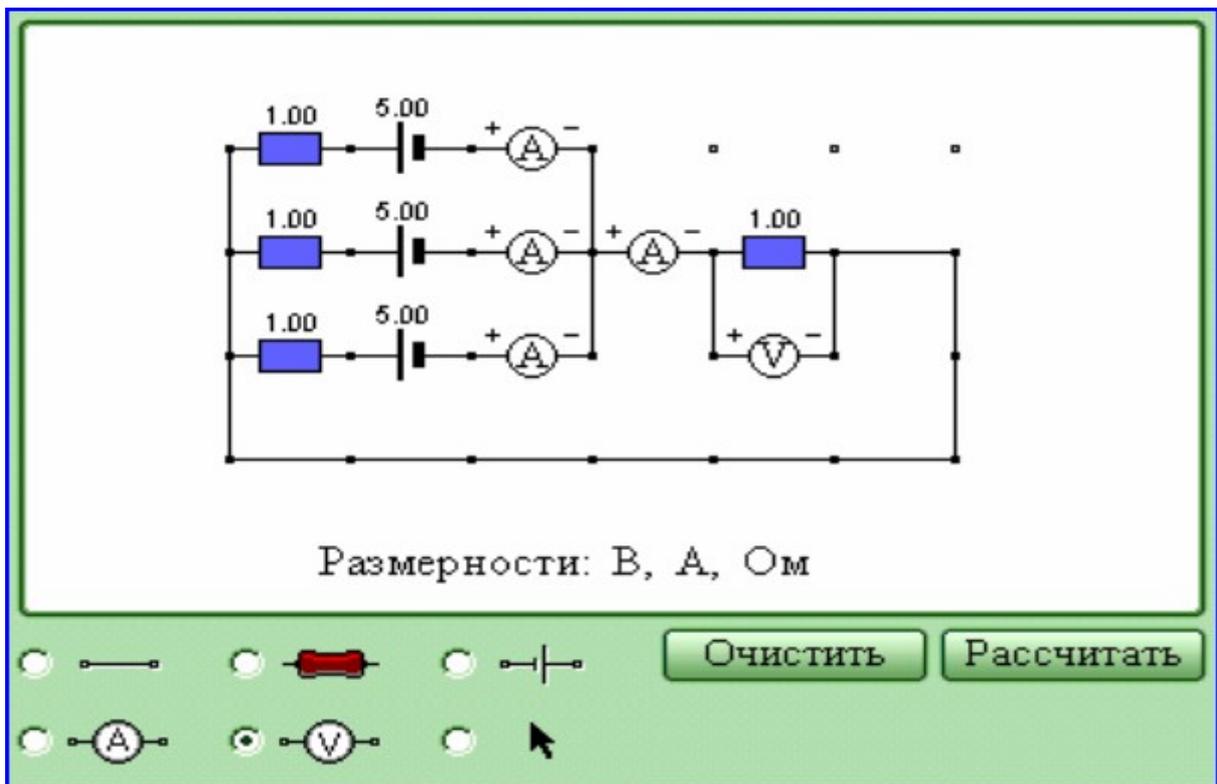


Рис.1. Модель разветвленной электрической цепи постоянного тока.

Внимательно рассмотрите рис.1, найдите все основные элементы и зарисуйте их в конспект.

Нарисуйте в конспекте эквивалентную схему цепи, расположив источники один под другим и учитывая наличие внутреннего сопротивления у каждого источника. С учетом задания для вашей бригады из табл. 2, укажите величины и знаки ЭДС, величины резисторов, направления токов в каждом участке и направления обхода каждого замкнутого контура. Составьте систему уравнений для нахождения токов в каждом участке.

**Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.**

## **ИЗМЕРЕНИЯ**

1. Соберите на экране заданную эквивалентную цепь. Для этого сначала щелкните левой кнопкой мыши над белой кнопкой около символа ЭДС в нижней части экрана (в ней появится черная точка). Переместите маркер мыши на рабочую часть экрана, где расположены точки. Ориентируйтесь на рисунок схемы в описании к данной ЛР. Щелкните левой кнопкой мыши в рабочей части экрана, там, где будет расположен первый источник ЭДС
2. Переместите маркер мыши вниз на одну клетку и снова щелкните левой кнопкой под тем местом, где расположился первый источник. Там появится второй источник ЭДС Аналогично разместите и третий источ-

- ник.
- Разместите далее последовательно с каждым источником резистор, изображающий его внутреннее сопротивление (щелкнув предварительно над кнопкой около изображения резистора в нижней части экрана) и амперметр (кнопка около прибора А там же). Затем расположите резистор нагрузки и последовательно соединенный с ним амперметр. Под нагрузкой расположите вольтметр (прибор V), измеряющий напряжение на нагрузке.
  - Подключите соединительные провода. Для этого нажмите кнопку провода внизу экрана, после чего переместите маркер мыши в рабочую зону схемы. Щелкните левой кнопкой мыши в точке, где проходит провод.
  - Установите значения параметров для каждого элемента. Для этого щелкните левой кнопкой мыши на кнопке со стрелкой. Затем щелкните на данном элементе. Подведите маркер мыши к кнопке появившегося регулятора, нажмите на левую кнопку мыши и, удерживая ее в нажатом состоянии, меняйте величину параметра и установите числовое значение, равное взятому из табл. 1 для вашей бригады.
  - Измерьте значения всех токов и напряжения на нагрузке (щелкнув мышью по кнопке «Рассчитать») и запишите их в табл. 2.
  - Меняя сопротивление резистора нагрузки  $R$ , повторите измерения параметров и заполните табл. 2.

**Таблица 1 (не перерисовывать). Характеристики источников ЭДС.**

Бригада	1	2	3	4	5	6	7	8
$E_1, E_2, E_3, В$	3,7,-2	4,-3,-8	3,6,-4	3,-2,-8	-6,5,8	5,8,-4	-4,6,-7	8,-4,6
$R_1, R_2, R_3, Ом$	2,1,1	1,3,1	2,1,2	1,1,2	2,1,1	1,2,1	1,1,2	1,3,1

**Таблица 2. Результаты измерений**

$R, Ом$	$I_1, А$	$I_2, А$	$I_3, А$	$I, А$	$U, В$
1					
2					
3					
4					
5					
6					

**Таблица 3. Результаты расчета**

$I_1, А$	$I_2, А$	$I_3, А$	$I, А$

### **ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА**

- Запишите для вашей цепи решение системы уравнений для всех токов в общем виде.

2. Рассчитайте значения всех токов для каждого сопротивления нагрузки и запишите в табл. 3.
3. Постройте график экспериментальной зависимости падения напряжения на нагрузке  $U$  от тока  $I$  через нее.
4. Сформулируйте выводы по графику.

### Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что такое электрический ток?
2. Дайте определение величины (силы) тока.
3. Дайте определение разности потенциалов (напряжения).
4. Напишите формулу, связывающую приращение потенциалов и напряжение.
5. Что такое резистор?
6. Какое соединение элементов называется последовательным?
7. Какое соединение элементов называется параллельным?
8. Напишите формулу для сопротивления последовательно соединенных резисторов.
9. Напишите формулу для сопротивления параллельно соединенных резисторов.
10. Напишите закон Ома для участка цепи. Сравните его с законом Ома в дифференциальной (локальной) форме.
11. Какой участок цепи называется неоднородным?
12. Запишите закон Ома для неоднородного участка цепи.
13. Какими характеристиками описывается источник ЭДС?
14. В каком месте находится внутреннее сопротивление источника ЭДС?
15. Как измерить ЭДС источника?
16. Что такое «короткое замыкание»?
17. Чему равен ток короткого замыкания?
18. Сформулируйте первый закон Кирхгофа.
19. Какое свойство заряда отражает первый закон Кирхгофа?
20. Запишите формулу для первого закона Кирхгофа.
21. Сформулируйте второй закон Кирхгофа.
22. Запишите формулу для второго закона Кирхгофа.
23. Что такое узел электрической цепи?
24. Что такое полная электрическая цепь?

### ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 2004. Гл.12.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М.: Высшая школа, 2000. Гл. 19.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

### 2\_7. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Ознакомьтесь с конспектом лекций и учебником [1,2]. Запустите программу. Выберите «Глава 1. Электродинамика» и «Модель 1.10. Магнитное поле прямого тока». Прочитайте краткие теоретические сведения.

Вызовите компьютерную модель «Модель 1.9. Магнитное поле витка с током», а затем «Модель 1.11. Магнитное поле соленоида». Прочитайте и запишите в свой конспект необходимые краткие теоретические сведения. Оформите конспект.

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- Знакомство с магнитным полем от различных источников и его моделированием.
- Экспериментальное подтверждение закономерностей для магнитного поля прямого провода и кругового витка (контура) с током.
- Экспериментальное определение величины магнитной постоянной.

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ (МП) называется то, что существует в области пространства, в которой на электрически нейтральный проводник с током действует сила, называемая магнитной.

ИСТОЧНИКОМ МП является движущаяся электрически заряженная частица (заряд), которая создает также и электрическое поле.

Если вблизи одной движущейся заряженной частицы (заряда №1) будет находиться вторая движущаяся с такой же скоростью  $V$  заряженная частица (заряд №2), то на второй заряд будут действовать две силы: электрическая (кулоновская)  $\vec{F}_{эл}$  и магнитная сила  $\vec{F}_M$ , которая будет меньше электрической в  $\left(\frac{V}{c}\right)^2$  раз, где  $c$  – скорость света.

Для практически любых ПРОВОДОВ с током выполняется ПРИНЦИП КВАЗИНЕЙТРАЛЬНОСТИ: несмотря на наличие и движение заряженных частиц внутри проводника, любой (не слишком малый) его отрезок имеет нулевой суммарный электрический заряд. Поэтому между обычными проводами с током наблюдается только магнитное взаимодействие.

МАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ – характеристика силового действия МП на проводник с током, векторная величина, обозначаемая символом  $\vec{B}$ .

ЛИНИИ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ – линии, в любой точке которых вектор индукции МП направлен по касательной.

Анализ взаимодействия движущихся зарядов с учетом эффектов теории

относительности (релятивизма) дает выражение для индукции  $d\vec{B}$  МП, создаваемой элементарным отрезком  $d\vec{L}$  с током  $I$ , расположенным в начале координат (закон Био–Савара–Лапласа или Б–С–Л):

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi r^2} [d\vec{L}, \vec{e}_r],$$

где  $\vec{r}$  – радиус-вектор точки наблюдения,  $\vec{e}_r$  – единичный радиус-вектор, направленный в точку наблюдения,  $\mu_0$  – магнитная постоянная.

МП подчиняется ПРИНЦИПУ СУПЕРПОЗИЦИИ: индукция МП нескольких источников является суммой индукций полей, создаваемых независимо каждым источником:

$$\vec{B}_{\text{СУМ}} = \sum_i \vec{B}_i.$$

ЦИРКУЛЯЦИЕЙ МП называется интеграл по замкнутому контуру от скалярного произведения индукции МП на элемент контура:

$$C_{0B} = \oint_{L_0} \vec{B} \cdot d\vec{L}.$$

ЗАКОН ЦИРКУЛЯЦИИ МП: циркуляция МП по замкнутому контуру  $L_0$  пропорциональна суммарному току, пронизывающему поверхность  $S(L_0)$ , ограниченную этим контуром  $L_0$ :

$$C_{0B} = \oint_{L_0} \vec{B} \cdot d\vec{L} = \mu_0 \sum_j I_j.$$

Закон Б–С–Л и принцип суперпозиции МП позволяют получить многие другие закономерности, в частности, индукцию магнитного поля прямого бесконечно длинного проводника с током:

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

Линии магнитной индукции поля прямого проводника с током представляют собой концентрические окружности, лежащие в плоскостях, перпендикулярных проводнику, с центрами, расположенными на его оси.

Индукция МП на оси кругового контура (витка) радиуса  $R$  с током  $I$  на расстоянии  $r$  от центра:

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

где  $\vec{p}_m : I S \vec{e}_n$  - МАГНИТНЫЙ МОМЕНТ витка площадью  $S$ ,  $\vec{e}_n$  - единичный

вектор нормали к поверхности витка.

СОЛЕНОИДОМ называется длинная прямая катушка с током. Величина индукции МП вблизи центра соленоида меняется очень мало. Такое поле можно считать практически однородным.

Из закона циркуляции МП можно получить формулу для индукции МП в центре соленоида  $B = \mu_0 I n$ , где  $n$  – число витков, приходящихся на единицу длины соленоида.

### МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

Рассмотрите внимательно рисунок, изображающий компьютерную модель. Найдите на нем все основные регуляторы и поле эксперимента. Зарисуйте необходимое в конспект.



Рис.1. Модель магнитного поля прямого бесконечно длинного провода

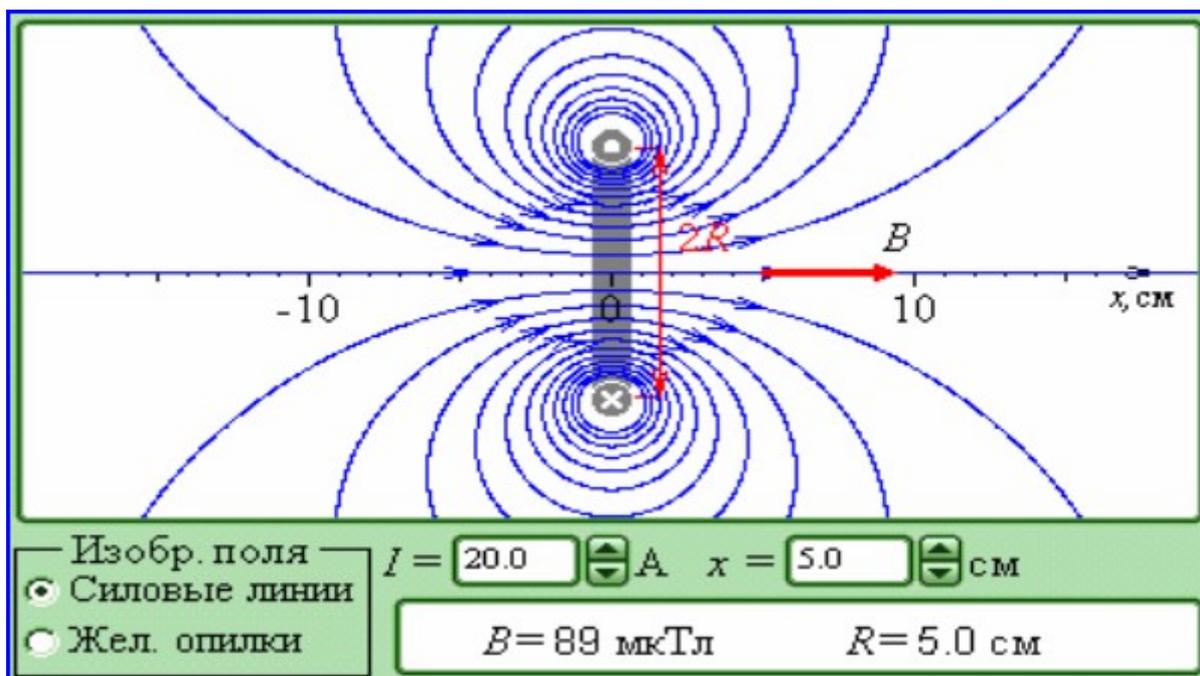


Рис.2. Модель магнитного поля кругового витка с током

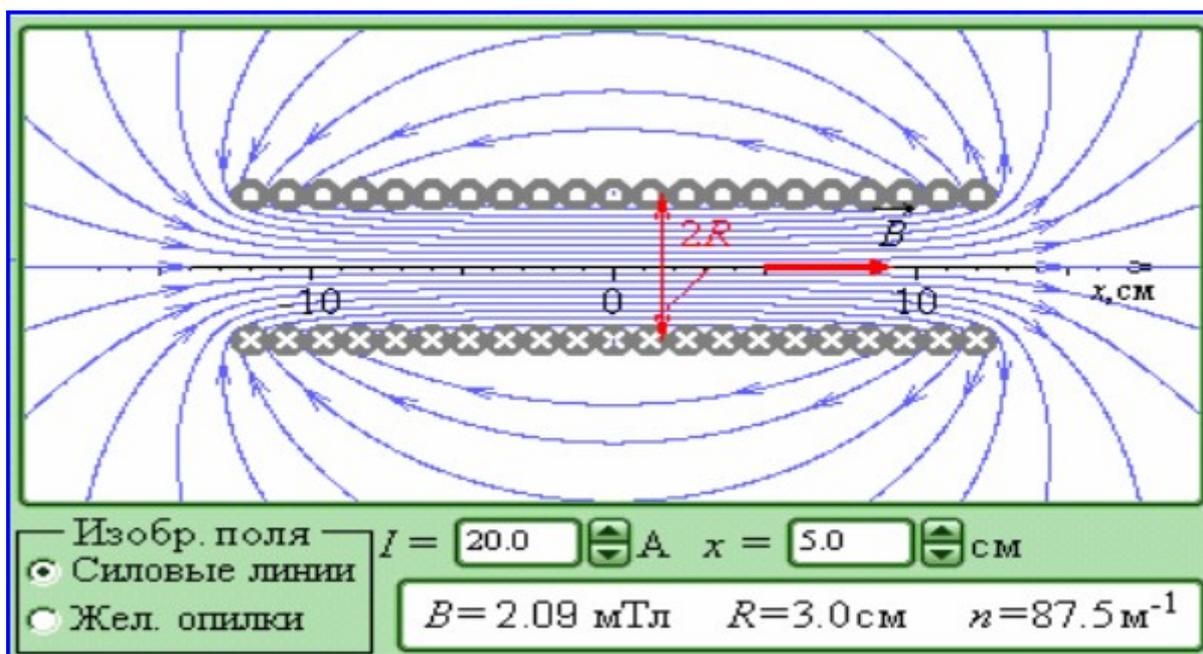


Рис.3. Модель магнитного поля соленоида

ТАБЛИЦА 1 (не перерисовывать). Значения величины тока

Бригады	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$
1 и 5	5	10	15	20
2 и 6	-5	-10	-15	-20
3 и 7	-15	-10	5	10
4 и 8	-20	-15	-10	5

ТАБЛИЦА 2. Результаты измерений

$r$ , см =	2	3	...	10
$1/r$ , м <sup>-1</sup>				
$B_1$ , Тл				
$B_2$ , Тл				
$B_3$ , Тл				
$B_4$ , Тл				

Подготовьте табл. 2, используя образец. Подготовьте также таблицы 3 и 4, аналогичные табл. 2, за исключением второй строчки, содержание которой см. в следующем разделе.

Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.

## ИЗМЕРЕНИЯ

*ЭКСПЕРИМЕНТ 1. Исследование магнитного поля прямого провода с током.*

1. Закройте окно эксперимента 3, нажав кнопку в правом верхнем углу внутреннего окна. Запустите, дважды щелкнув мышью, эксперимент «Модель 1.10. Магнитное поле прямого тока». Наблюдайте линии индукции МП прямого провода стоком.
2. Щелкая мышью кнопку регулятора тока, установите величину тока, указанную в таблице 2 для вашей бригады.
3. Перемещая мышью «руку» вблизи провода, нажимайте левую кнопку мыши на расстояниях  $r$  до оси провода, указанных в табл. 1. Значения  $r$  и  $B$  занесите в табл. 1. Повторите измерения для трех других значений тока из табл. 2.

*ЭКСПЕРИМЕНТ 2. Исследование магнитного поля витка с током.*

1. Закройте окно эксперимента 1, нажав кнопку в правом верхнем углу внутреннего окна. Запустите, дважды щелкнув мышью, эксперимент «Модель 1.9. Магнитное поле кругового витка с током». Наблюдайте линии индукции МП кругового витка (контура).
2. Щелкая мышью кнопку регулятора тока, установите величину тока, указанную в табл. 2 для вашей бригады.
3. Перемещая мышью «руку» по оси витка, нажимайте левую кнопку мыши на расстояниях  $r$  до оси витка, указанных в табл. 1. Значения  $r$  и  $B$  занесите в табл. 3, аналогичную табл. 1 (кроме второй строки, в которой здесь надо записать

$$\frac{1}{(R^2 + r^2)^{3/2}}, \text{ М}^{-3}.$$

4. Повторите измерения для трех других значений тока из табл. 2.

### *ЭКСПЕРИМЕНТ 3. Исследование магнитного поля соленоида.*

1. Закройте окно эксперимента 2, нажав кнопку в правом верхнем углу внутреннего окна. Запустите, дважды щелкнув мышью, следующий эксперимент «Модель 1.11. Магнитное поле соленоида». Наблюдайте линии индукции МП соленоида.
2. Щелкая мышью кнопку регулятора тока, установите величину тока, указанную в табл. 2 для вашей бригады.
3. Перемещая мышью «руку» по оси соленоида, нажимайте левую кнопку мыши на расстояниях  $r$  до оси соленоида, указанных в табл. 1. Значения  $r$  и  $B$  занесите в табл. 4, аналогичную табл. 1 (кроме второй строки, в которой здесь не надо записывать ничего). Повторите измерения для трех других значений тока из табл. 2.

### **ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА**

1. Вычислите и запишите в табл. 1, 3 и 4 значения для второй строки.
2. Постройте на одном листе графики зависимости индукции МП ( $B$ ) прямого провода с током от обратного расстояния  $\left(\frac{1}{r}\right)$ .
3. Постройте на втором листе графики зависимости индукции МП ( $B$ ) на оси витка с током от куба обратного расстояния

$$\frac{1}{(R^2 + r^2)^{3/2}}.$$

4. На третьем листе постройте графики зависимости индукции МП на оси соленоида от расстояния до его центра.
5. По тангенсу угла наклона графиков на первых двух листах определите постоянную, используя для первого чертежа формулу

$$\mu_0 = \frac{2\pi}{I} \frac{\Delta B}{\Delta\left(\frac{1}{r}\right)} \quad \text{и}$$

$$\mu_0 = \frac{2}{IR^2} \frac{\Delta B}{\Delta\left(\frac{1}{(R^2 + r^2)^{3/2}}\right)}$$

для второго.

6. Вычислите среднее значение магнитной постоянной.
7. Для магнитного поля соленоида при каждом токе определите протяженность  $\Delta r$  области однородности, в которой индукция меняется не более, чем на 10 % от максимальной. Вычислите среднее значение области однородности.
8. Запишите ответы и проанализируйте ответ и график.

### Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что такое магнитное поле (МП)?
2. Назовите источники МП.
3. Какие силы действуют между движущимися зарядами?
4. Во сколько раз магнитная сила меньше электрической для двух движущихся точечных электрических зарядов?
5. Сформулируйте определение квазинейтральности проводов с током.
6. Какие силы и почему действуют между проводами с током?
7. Дайте определение линии индукции МП. Зачем их рисуют?
8. Почему металлические опилки выстраиваются вдоль магнитных линий?
9. Запишите закон Био–Савара–Лапласа. В чем он похож на закон Кулона?
10. Сформулируйте принцип суперпозиции для МП.
11. Дайте определение циркуляции МП.
12. Сформулируйте и запишите формулу закона циркуляции МП.
13. Сформулируйте и запишите формулу для МП прямого провода.
14. Как выглядят линии индукции МП прямого провода с током?
15. Сформулируйте и запишите формулу для МП на оси кругового витка (контура) с током.
16. Что такое магнитный момент витка с током?
17. Какую форму имеет линия индукции, проходящая через центр витка с током?
18. Что такое соленоид и для чего он используется?
19. Чему равно магнитное поле в центре соленоида?
20. Как выглядят линии индукции МП внутри соленоида?
21. Является ли МП внутри соленоида точно однородным?
22. Как определить протяженность области однородности МП внутри соленоида, если задана точность?

### ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 2004. Гл.14, §§ 109-119.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М.: Высшая школа, 2000. Гл. 22, §§ 22.1-22.3.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

### 2\_8. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Ознакомьтесь с конспектом лекций и учебником [1,2]. Запустите программу. Выберите «Глава 1. Электродинамика» и «Модель 1.15. Электромагнитная индукция».

Прочитайте краткие теоретические сведения. Оформите конспект.

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- Знакомство с явлением электромагнитной индукции (ЭМИ) и его моделированием.
- Экспериментальное подтверждение закономерностей ЭМИ.

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

ЭЛЕМЕНТАРНЫМ МАГНИТНЫМ ПОТОКОМ  $d\Phi_B$  через физически малый элемент поверхности площадью  $dS$  называется скалярное произведение вектора индукции магнитного поля  $\vec{B}$  на вектор нормали  $\vec{n}$  к данному элементу поверхности и на площадь  $dS$ :

$$d\Phi_B = (\vec{B} \vec{n}) \cdot dS .$$

МАГНИТНЫМ ПОТОКОМ  $\Phi_B$  через поверхность площадью  $S$  называется сумма всех элементарных потоков через все элементы этой поверхности (интеграл по поверхности):

$$\Phi_B = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} .$$

Анализируя свойства интеграла в правой части данного соотношения, можем получить условия, когда для определения потока не требуется интегрирование.

Простейшие варианты:

- потока нет ( $\Phi_B = 0$ ), если 1)  $B = 0$ , или 2) вектор магнитной индукции направлен по касательной к поверхности в любой ее точке ( $\vec{B} \perp \vec{n}$ ).
- Второй вариант: поток есть произведение индукции на площадь  $\Phi_B = B \cdot S$ , если  $(\vec{B} \cdot \vec{n}) = const$ , то есть одновременно выполняются два условия: вектор индукции направлен по нормали и имеет одну и ту же величину в любой точке поверхности.

ИНДУКЦИЕЙ называется явление возникновения одного поля (например, электрического) при изменении другого поля (например, магнитного). В общем случае циркуляция одного поля пропорциональна скорости изменения

потока второго поля (через поверхность, ограниченную контуром, по которому рассчитана циркуляция).

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИЕЙ** называется явление возникновения электрического поля при изменении потока магнитного поля.

**ЗАКОН ЭМИ:** циркуляция электрического поля по замкнутому контуру  $C_{0E}$  пропорциональна скорости изменения потока магнитного поля  $\Phi_B$  через поверхность  $S (L_0)$ , ограниченную контуром  $L_0$ , по которому рассчитана циркуляция. Математически:

$$C_{0E} = - \frac{\partial \Phi_B}{\partial t} ,$$

где знак « $\rightarrow$ » соответствует «правилу Ленца» (см. учебник).

В расшифрованном виде

$$\oint_{L_0} \vec{E} d\vec{L} = - \frac{\partial}{\partial t} \left( \int_{S(L_0)} \vec{B} d\vec{S} \right) .$$

В результате ЭМИ возникает электрическое поле с ненулевой циркуляцией. Поле с ненулевой циркуляцией называется вихревым.

Если в таком поле находится проводящее вещество, то в веществе возникает **ВИХРЕВОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК**, величина которого пропорциональна напряженности вихревого электрического поля. Такие токи называются токами Фуко.

Если проводящее вещество имеет форму **ЗАМКНУТОГО КОНТУРА**, тогда циркуляция электрического поля в нем по определению является ЭДС, которая в случае ЭМИ называется ЭДС индукции. Закон ЭМИ для проводящего контура будет выглядеть так:

$$\text{ЭДС}_{\text{инд}} = - \frac{\partial \Phi_B}{\partial t} .$$

Ток, который в этом случае появляется в контуре, называется ИНДУКЦИОННЫМ.

Обозначая ЭДС индукции символом  $\mathcal{E}_{\text{инд}}$  и используя закон Ома для полной цепи, получим выражение для тока индукции:

$$i_{\text{инд}} = \mathcal{E}_{\text{инд}} / R ,$$

где  $R$  – сопротивление контура.

Если имеется замкнутый контур с переменным током, тогда магнитное поле с изменяющимся потоком создается собственным током в этом контуре, и в соответствии с законом ЭМИ в контуре возникает дополнительная ЭДС,

называемая ЭДС самоиндукции.

Явлением САМОИНДУКЦИИ называется возникновение ЭДС самоиндукции при протекании по проводнику переменного тока.

ЗАКОН самоиндукции:

$$\text{ЭДС}_{\text{САМОИНД}} = -L \frac{di}{dt} ,$$

где  $L$  – индуктивность проводника.

### МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

В данной лабораторной работе используется компьютерная модель, в которой изменяющийся магнитный поток возникает в результате движения проводящей перемычки по параллельным проводникам, замкнутым с одной стороны. Эта система изображена на рисунке:

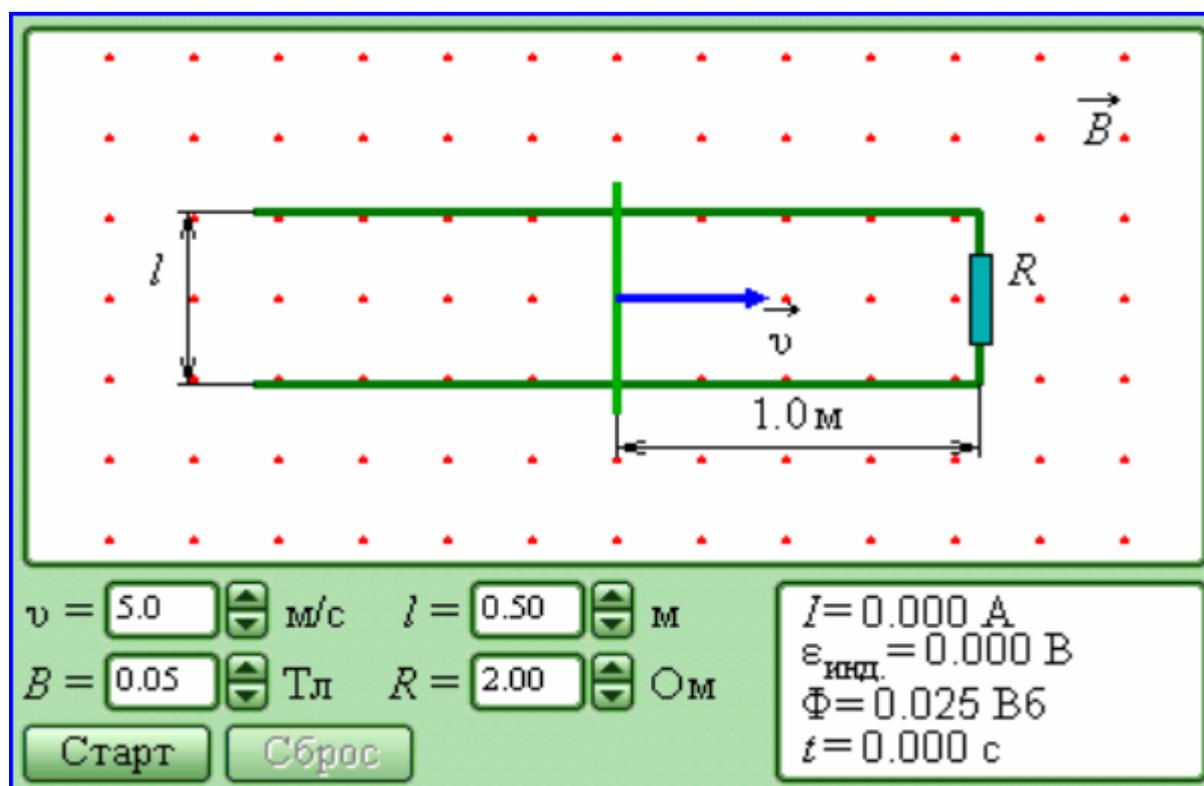


Рис.1. Модель явления электромагнитной индукции

ЗАДАЧА:

Проводящая перемычка 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 ток в перемычке, если ее сопротивление  $R$ , а сопротивлением проводников можно пре-

небрежь.

Решив задачу в черновике конспекта, получите уравнение для тока в общем виде.

Подготовьте табл. 2, 3 и 4, используя в качестве образца табл. 2.

ТАБЛИЦА 1 (не перерисовывать). Значения характеристик

Бригады	$R$ , Ом	$B_1$ , мТл	$B_2$ , мТл	$B_3$ , мТл
1 и 5	1	-30	40	90
2 и 6	2	-40	20	80
3 и 7	1	-50	10	70
4 и 8	2	-60	-20	100

ТАБЛИЦА 2. Результаты измерений (12 столбцов).  $B = \underline{\hspace{2cm}}$  мТл

$v$ , м/с =	-10	-8	...	10
ЭДС, В				
$I$ , мА				

Для бригад 1–4  $L = 1$  м, для бригад 5–8  $L = 0,7$  м.

Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.

### ИЗМЕРЕНИЯ

1. Закройте окно теории (если вы ее вызывали), нажав кнопку в правом верхнем углу внутреннего окна. Запустите эксперимент, щелкнув мышью по кнопке «Старт». Наблюдайте движение перемычки и изменение магнитного потока  $\Phi$  (цифры внизу окна).
2. Зацепив мышью, перемещайте движки регуляторов
  - $L$  – расстояния между проводами,
  - $R$  – сопротивления перемычки,
  - $B_1$  – величины индукции магнитного поля,и зафиксируйте значения, указанные в табл. 2 и под ней для вашей бригады.
3. Установив указанное в табл. 1 значение скорости движения перемычки, нажмите левую кнопку мыши, когда ее маркер размещен над кнопкой «Старт». Значения ЭДС и тока индукции занесите в табл. 1. Повторите измерения для других значений скорости из табл. 1.
4. Повторите измерения для двух других значений индукции магнитного поля, выбирая их из табл. 2. Полученные результаты запишите в табл. 3 и 4.

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

1. Постройте на одном листе графики зависимости тока индукции от скорости движения переключки при трех значениях индукции магнитного поля.
2. Для каждой прямой определите тангенс угла наклона по формуле

$$\operatorname{tg}(\varphi) = \frac{\Delta i}{\Delta V} .$$

3. Вычислите теоретическое значение тангенса для каждой прямой по формуле

$$\operatorname{tg}(\varphi)_{\text{ТЕОР}} = \frac{BL}{R} .$$

4. Заполните таблицу результатов измерений

Номер измерения	$\operatorname{tg}(\varphi)_{\text{ЭКСП}}$ , Ас/м	$\operatorname{tg}(\varphi)_{\text{ТЕОР}}$ , Ас/м

5. Сделайте выводы по графикам и результатам измерений.

### **Вопросы и задания для самоконтроля**

1. Что называется элементарным магнитным потоком?
2. Что называется магнитным потоком?
3. Магнитный поток это векторная или скалярная характеристика МП?
4. При каких условиях магнитный поток равен нулю?
5. При каких условиях магнитный поток равен произведению индукции магнитного поля на площадь контура?
6. Дайте определение циркуляции магнитного поля.
7. Магнитный циркуляция это векторная или скалярная характеристика МП?
8. Что такое элементарная циркуляция?
9. При каких условиях циркуляция равна 0?
10. При каких условиях циркуляция рассчитывается особенно просто 0?
11. Сформулируйте определение явления электромагнитной индукции.
12. Сформулируйте закон электромагнитной индукции в вакууме.
13. Запишите закон ЭМИ в расшифрованном виде.
14. При каких условиях наблюдается явление ЭМИ в вакууме?
15. Какое поле является вихревым?
16. Что такое ток Фуко?

17. Чем отличается электрическое поле, созданное точечным зарядом, от электрического поля, появляющегося при ЭМИ?
18. Сформулируйте закон ЭМИ для замкнутого проводящего контура.
19. При каких условиях возникает ЭДС самоиндукции?
20. Сформулируйте определение явления самоиндукции.
21. При каких условиях наблюдается явление самоиндукции?
22. Сформулируйте словами закон самоиндукции.
23. Назовите все способы создания переменного магнитного потока.
24. Сформулируйте определение явления взаимной индукции.
25. При каких условиях наблюдается явление взаимной индукции?
26. Как изменяется со временем магнитный поток в данной работе?
27. Как выглядит поверхность, через которую формируется переменный магнитный поток в данной работе?
28. Какова зависимость магнитного потока от времени в данной работе?
29. Как направлен вектор магнитной индукции в данной работе?

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 2004. Гл.15.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М.: Высшая школа, 2000. Гл. 25.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

### 2\_3. СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ В КОНТУРЕ

Ознакомьтесь с теорией в конспекте, учебнике [1,2]. Запустите программу. Выберите «Глава 2. Электромагнитные колебания и волны» и «Модель 2.3. Свободные колебания в RLC–контуре». Прочитайте краткие теоретические сведения. Оформите конспект.

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- Знакомство с процессом свободных затухающих колебаний в электрическом колебательном контуре и его компьютерным моделированием.
- Экспериментальное исследование закономерностей свободных затухающих колебаний.
- Экспериментальное определение величины индуктивности контура.

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

КОЛЕБАТЕЛЬНЫМ КОНТУРОМ называется замкнутая цепь, содержащая катушку индуктивности с индуктивностью  $L$  и конденсатор с емкостью  $C$ . Если в цепи нет активного сопротивления  $R$  (резистора), то в контуре возможны гармонические (незатухающие) колебания тока  $I$ , заряда конденсатора  $q$  и напряжения на элементах.

НАПРЯЖЕНИЕ НА КОНДЕНСАТОРЕ:  $U_c = \frac{q}{C}$  .

ЭДС САМОИНДУКЦИИ В КАТУШКЕ:  $\varepsilon = -L \frac{dI}{dt}$  .

НАПРЯЖЕНИЕ НА РЕЗИСТОРЕ:  $U_R = IR$  .

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКА:  $I = \frac{dq}{dt}$  .

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ свободных незатухающих колебаний:

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + \omega_0^2 q = 0 \quad ,$$

где  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  – СОБСТВЕННАЯ ЧАСТОТА контура.

ПЕРИОД:  $T = 2\pi \sqrt{LC}$  .

Его решение

$$q(t) = q_v \cos(\omega_0 t + \alpha),$$

где  $\alpha$  – начальная фаза.

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ свободных затухающих колеба-

ний

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = 0 ,$$

где  $\beta = \frac{R}{2L}$  – коэффициент затухания.

Его решение:

$$q(t) = q_{v0} e^{-\beta t} \cos(\omega t + \alpha),$$

где  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$  – частота затухающих колебаний.

ПОСТОЯННАЯ ВРЕМЕНИ ЗАТУХАНИЯ в контуре  $\tau$  есть время, за которое амплитуда колебаний уменьшается в  $e = 2,73$  раз.

На графике зависимости амплитуды затухающих колебаний от времени (рис.1) касательная, проведенная к этому графику в начальный момент времени, пересекает ось времени в точке  $t = \tau$ .



Рис.1. Свободные затухающие колебания заряда конденсатора в контуре

ЛОГАРИФМИЧЕСКИМ ДЕКРЕМЕНТНОМ ЗАТУХАНИЯ называется величина, определяемая формулой

$$\lambda = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} = \beta T .$$

ДОБРОТНОСТЬ контура равна

$$Q = \frac{\pi}{\lambda} .$$

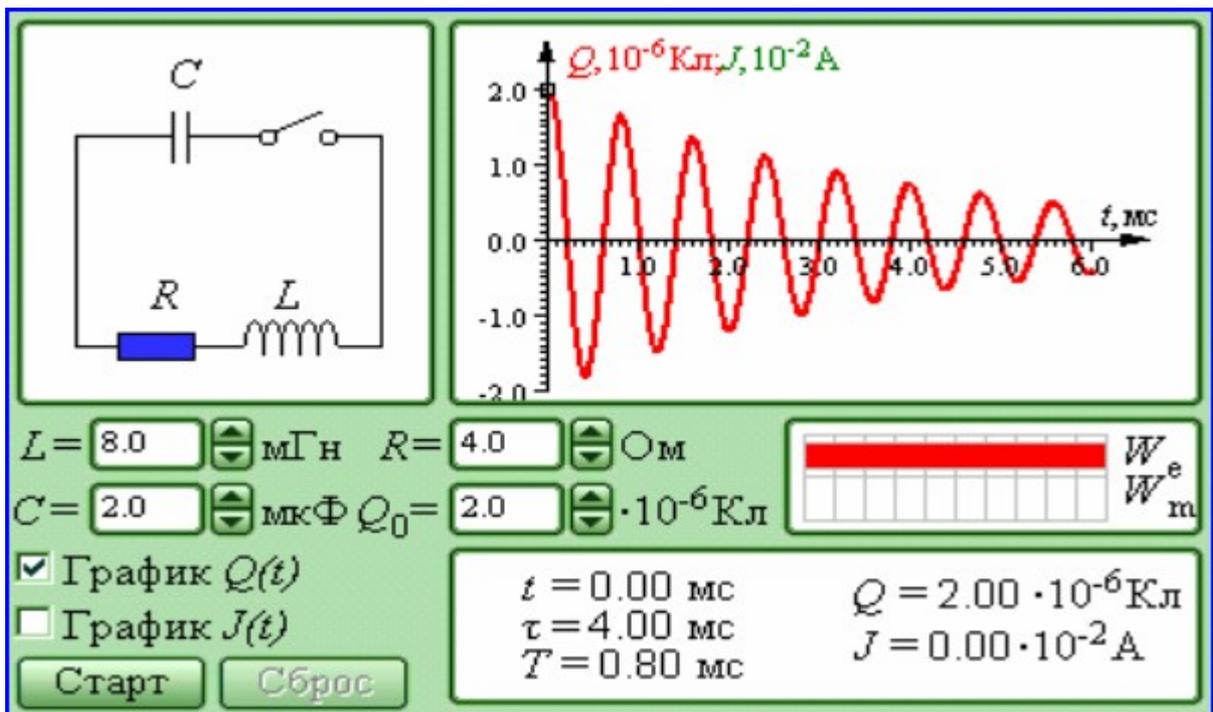


Рис.2. Модель колебательного контура с затуханием

## МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

Закройте окно теории, если вы его открывали. Внимательно рассмотрите рис.2, найдите все регуляторы и другие основные элементы и зарисуйте их в конспект.

**Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.**

## ИЗМЕРЕНИЯ

1. Нажмите мышью кнопку «Сброс». Подведите маркер мыши к кнопке регулятора емкости конденсатора  $C$ . Нажимая на левую кнопку мыши, меняйте величину емкости конденсатора и установите числовое значение, равное взятому из табл. 1 для вашей бригады.
2. Аналогичным способом установите величину индуктивности в соответствии с табл. 1.
3. Установите значение сопротивления резистора  $R = 1$  Ом. Нажав кнопку «Старт», наблюдайте график зависимости заряда конденсатора от времени.
4. Останавливая процесс кнопкой «Стоп», измерьте значения первых шести амплитуд и запишите их в табл. 2.
5. После измерения снова запустите процесс кнопкой «Старт». Меняя сопротивление  $R$ , повторите измерения амплитуд и заполните таблицу 2.

**ТАБЛИЦА 1** (не перерисовывать). **Значения емкости конденсатора и индуктивности катушки**

Бригада	1	2	3	4	5	6	7	8
C, мкФ	3	3	2,7	2,7	2,4	2,4	2	2
L, мГн	6	7	8	9	10	9	8	7

**ТАБЛИЦА 2.** Результаты измерений при C = \_\_\_\_\_ мкФ, L = \_\_\_\_\_ мГн, T = \_\_\_\_\_ мс.

R Ом	A <sub>1</sub> мм	A <sub>2</sub> мм	A <sub>3</sub> мм	A <sub>4</sub> мм	A <sub>5</sub> мм	A <sub>6</sub> мм	τ мс	β с <sup>-1</sup>
1								
2								
3								
4								
5								
6								
t, мс								

### ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

1. Рассчитайте значения периода колебаний и запишите в заголовке табл. 2.
2. Рассчитайте время  $t$ , при котором измерена соответствующая амплитуда и запишите в табл. 2.
3. Постройте на одном чертеже графики экспериментальных зависимостей амплитуды колебания  $A$  от времени  $t$  (6 линий, соответствующих разным  $R$ ).
4. Для каждого графика постройте касательную к нему в начальный момент времени. Продолжив касательную до пересечения с осью времени, определите экспериментальное значение постоянной времени затухания  $\tau$  и запишите в табл. 2.
5. Рассчитайте величины коэффициента затухания  $\beta = \frac{1}{\tau}$  и также внесите в табл. 2.
6. Постройте график зависимости коэффициента затухания от сопротивления резистора.
7. По графику  $\beta(R)$  определите индуктивность контура, используя формулу

$$L = \frac{1}{2} \frac{\Delta R}{\Delta \beta} .$$

8. Запишите ответ и сформулируйте выводы по ответу и графикам.

## Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что такое колебательный контур?
2. Каковы электрические характеристики резистора, конденсатора, катушки?
3. Дайте определение гармонических колебаний.
4. Что такое период колебания?
5. Какая физическая величина испытывает колебания в колебательном контуре?
6. Напишите формулу для напряжения на конденсаторе.
7. Напишите формулу для напряжения на катушке индуктивности. Какое другое название она имеет?
8. Напишите формулу для напряжения на резисторе. Какое другое название она имеет?
9. Какие законы выполняются для тока и напряжения на отдельных элементах в колебательном контуре?
10. Сформулируйте и запишите в виде формулы закон электромагнитной индукции в общем виде.
11. Сформулируйте и запишите в виде формулы закон электромагнитной индукции для проводящего контура.
12. Сформулируйте и запишите в виде формулы закон самоиндукции.
13. Запишите дифференциальное уравнение для заряда на конденсаторе в контуре, где существуют свободные гармонические колебания.
14. Запишите дифференциальное уравнение для заряда на конденсаторе в контуре, где существуют свободные затухающие колебания.
15. Напишите формулу циклической частоты свободных гармонических колебаний в контуре.
16. Напишите формулу зависимости заряда на конденсаторе от времени при свободных гармонических колебаниях в контуре.
17. Напишите формулу циклической частоты свободных затухающих колебаний в контуре.
18. Напишите формулу зависимости заряда на конденсаторе от времени при свободных затухающих колебаниях в контуре.
19. Напишите формулу для коэффициента затухания.
20. Дайте определение постоянной времени затухания.
21. Напишите формулу логарифмического декремента затухания. Что он характеризует?
22. Напишите формулу связи логарифмического декремента затухания с коэффициентом затухания.
23. Напишите формулу для добротности контура. Что определяет добротность?
24. Нарисуйте зависимость заряда на конденсаторе от времени при свободных затухающих колебаниях в контуре. Покажите на рисунке, как определяется графически постоянная времени затухания.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 2004. Гл.18, §§ 143, 146.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М.: Высшая школа, 2000. Гл. 27, § 27.3, Гл.28, § 28.1.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

### 2\_9. ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ В RLC-КОНТУРЕ

Ознакомьтесь с конспектом лекций и учебником. Запустите программу компьютерного моделирования. Выберите «Глава 2. Электричество и магнетизм» и «Модель 2.12. Вынужденные колебания в RLC-контуре». Прочитайте краткие теоретические сведения. Оформите конспект.

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- Знакомство с процессами в колебательном RLC-контуре и их компьютерным моделированием.
- Экспериментальное подтверждение закономерностей при вынужденных колебаниях в RLC-контуре.

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Повторите основные определения для колебательного движения. Прочитайте также снова теорию, в которой рассмотрены свободные колебания в контуре.

ВЫНУЖДЕННЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ называются процессы, происходящие в контуре, содержащем конденсатор, катушку индуктивности, резистор и источник с переменной ЭДС, включенные последовательно и образующие замкнутую электрическую цепь.

Если ЭДС источника меняется по гармоническому закону, то в контуре наблюдаются ВЫНУЖДЕННЫЕ ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ. При этом ток в контуре также будет переменным, подчиняющимся закону Ома в комплексной форме.

КОМПЛЕКСНАЯ ВЕЛИЧИНА есть определенная совокупность двух алгебраических чисел

$$\hat{Z} = A + iB = Z e^{i\phi},$$

где  $A$  – действительная часть,  $B$  – мнимая часть,  $Z$  – модуль,  $\phi$  – фаза комплексной величины.

ГРАФИЧЕСКИ  $\hat{Z}$  изображается, как радиус-вектор на комплексной плоскости: его длина равна  $Z$ , а угол между вектором и горизонтальной (действительной) осью равен  $\phi$ .

#### КОМПЛЕКСНЫЙ ТОК И КОМПЛЕКСНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ

$$\left. \begin{aligned} \hat{I}(t) &= \hat{I}_0 \cdot e^{i\omega t} \\ \hat{U}(t) &= \hat{U}_0 \cdot e^{i\omega t} \end{aligned} \right\} \text{— это радиус-векторы в комплексной плоскости, которые вращаются с угловой скоростью } \omega.$$

Здесь  $\hat{U}_0 = U_0 \cdot e^{i\phi_{om}}$  – КОМПЛЕКСНАЯ АМПЛИТУДА НАПРЯЖЕНИЯ;

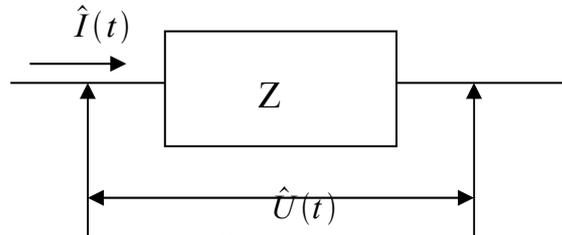
$\hat{I}_0 = I_0 \cdot e^{i\phi_{oi}}$  – КОМПЛЕКСНАЯ АМПЛИТУДА ТОКА.

$\hat{I}_0$  и  $\hat{U}_0$  – комплексные векторы, которые на комплексной плоскости неподвижны. Они соответствуют «мгновенной фотографии» реальных комплексных токов и напряжений, сделанной в начальный момент времени ( $t = 0$ ).

КОМПЛЕКСНАЯ АМПЛИТУДА – сама комплексная величина, взятая в начальный момент времени.

Математически:

$$\frac{\hat{U}_0}{\hat{I}_0} = \hat{Z} \quad (\text{импеданс}),$$



ИМПЕДАНС – это отношение комплексной амплитуды напряжения на данном элементе, к комплексной амплитуде тока через данный элемент.

Модуль импеданса называется ПОЛНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ цепи.

Импеданс равен отношению комплексных амплитуд:

$$\hat{Z} = \frac{\hat{U}_0}{\hat{I}_0} = \frac{U_0}{I_0} e^{i(\Delta\phi)},$$

где  $\Delta\phi = \phi_u - \phi_i$  – разность фаз между напряжением и током на данном элементе.

Полное электрическое сопротивление равно отношению «настоящих» амплитуд напряжения и тока.

а) РЕЗИСТОР:  $\frac{U}{I} = R$ ;  $\frac{\hat{U}_0}{\hat{I}_0} = R$ ; т.к. фазы напряжения и тока одинаковы, то

импеданс резистора равен  $R$ :  $Z_R \equiv X_R = R$ .

б) КАТУШКА ИНДУКТИВНОСТИ: Действует закон электромагнитной индукции (самоиндукции):

$$\varepsilon_{c.u.} = -L \frac{dI}{dt}.$$

Использував его и закон Ома для комплексных величин, получим:

$$\hat{U}_L = L \frac{d\hat{I}}{dt}.$$

Пусть  $\hat{I}(t) = I_0 e^{i\omega t}$ . Тогда  $\frac{d\hat{I}}{dt} = I_0 e^{i\omega t} (i\omega)$ .

После подстановки в закон самоиндукции получим

$$\hat{U}_L = L(i\omega) [I_0 e^{i\omega t}] = L(i\omega) \cdot \hat{I}(t) .$$

Делим:  $\frac{\hat{U}_L}{\hat{I}} = i\omega L .$

Отсюда  $\hat{X}_L = i\omega L$  – импеданс катушки индуктивности.

Напряжение на катушке **ОПЕРЕЖАЕТ** по фазе ток через нее на  $\pi/2$ .

в) **КОНДЕНСАТОР**: Напряжение на конденсаторе  $U_c = \frac{Q}{C} .$

Дифференцируем:  $\frac{dU_c}{dt} = \frac{1}{C} \frac{dQ}{dt} = \frac{1}{C} I ,$

или для комплексных величин  $\frac{d\hat{U}_c}{dt} = \frac{1}{C} \hat{I} .$

Пусть  $U_c = U_{0c} e^{i\omega t}$ , тогда  $\hat{I} = C \cdot \frac{d\hat{U}_c}{dt} = C \cdot i \cdot \omega \cdot \hat{U}_c(t) .$

Найдем отношение  $\frac{\hat{U}_c}{\hat{I}} = \frac{1}{i\omega C} = -\frac{i}{\omega C}$ ; отсюда

$$\hat{X}_c = -\frac{i}{\omega C}$$

– комплексное сопротивление (импеданс) конденсатора.

Напряжение на конденсаторе **ОТСТАЕТ** по фазе от тока через него на  $\pi/2$ .

Модуль комплексного сопротивления (катушки или конденсатора) называется **РЕАКТИВНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ** (индуктивным или емкостным). Обозначается символом без крышечки над ним.

Все элементы в контуре соединены последовательно, поэтому для нахождения импеданса контура надо просуммировать импедансы всех элементов:

$$\hat{Z}_K = R + \hat{X}_L + \hat{X}_c .$$

После подстановки можем получить модуль импеданса, то есть полное сопротивление контура:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} .$$

**РЕЗОНАНСОМ** для тока называется явление резкого увеличения амплитуды колебаний тока при приближении частоты ЭДС к некоторому значению,

называемому резонансной частотой  $\omega_{PE3}$ . Нетрудно видеть, что максимум амплитуды тока будет тогда, когда минимально полное сопротивление контура, или

$$Z_{PE3} = R \text{ и } \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C},$$
$$\text{отсюда } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}},$$

что соответствует частоте свободных колебаний в контуре.

МАКСИМУМ напряжения на конденсаторе соответствует резонансу для напряжения, который наблюдается при несколько меньшей частоте ЭДС:

$$\omega_{PE3} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{2L^2}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2},$$

где  $\delta = \frac{R}{2L}$  – коэффициент затухания для данного контура.

Амплитуда резонансного напряжения на конденсаторе  $U_{0C}$  пропорциональна амплитуде ЭДС и добротности контура  $Q$ :  $U_{0C} = Q \cdot \epsilon_0$ .

При не слишком большом затухании в контуре добротность определяется соотношением

$$Q = \frac{\rho}{L},$$

где  $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$  называется характеристическим сопротивлением контура. Чем больше добротность, тем «острее» резонанс.

РЕЗОНАНСНОЙ КРИВОЙ называется зависимость амплитуды напряжения на конденсаторе от частоты ЭДС.

## **МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ**

Внимательно рассмотрите рис.1 для компьютерной модели.

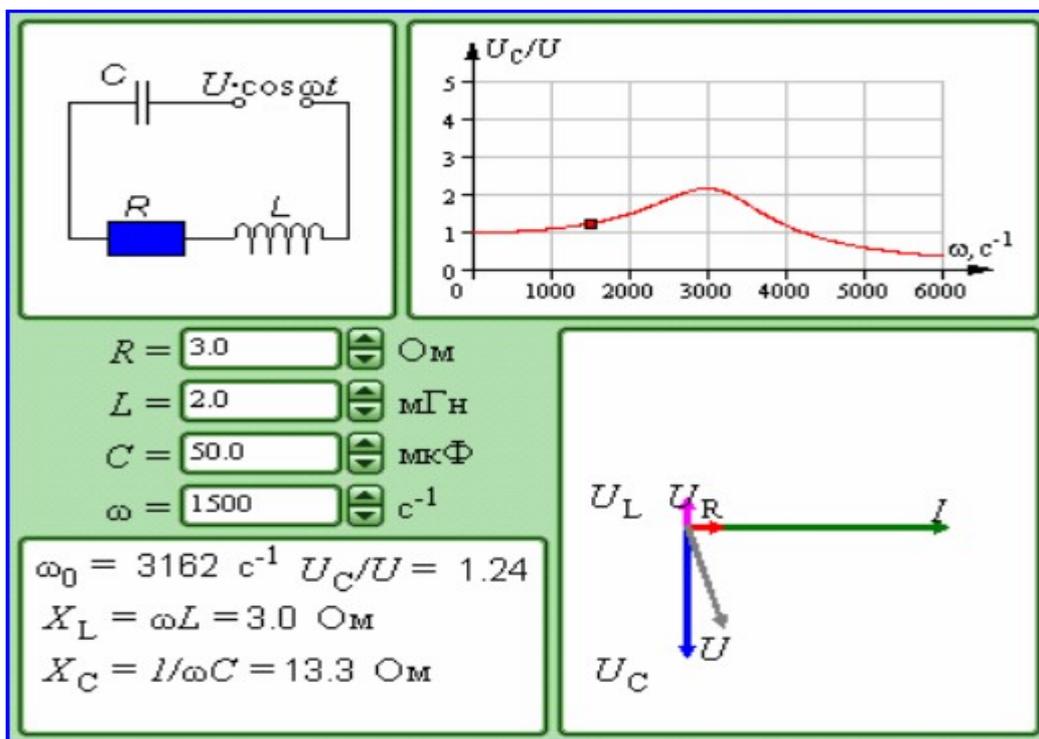


Рис.1. Модель вынужденных колебаний в контуре.

Перерисуйте необходимое в конспект, используя обозначения, принятые в нашей теоретической части ( $\epsilon_0$  вместо  $U$ ,  $U_{0C}$  вместо  $U_C$ ,  $U_{0L}$  вместо  $U_L$  и  $U_{0R}$  вместо  $U_R$ ).

Подготовьте табл. 2, используя образец. Подготовьте также табл. 3 и 4, аналогичные табл.2.

**ТАБЛИЦА 1 (не перерисовывать). Значения характеристик**

Бригады	$R$ , Ом	$L_1$ , мГн	$L_2$ , мГн	$L_3$ , мГн
1 или 5	1 или 2	1,0	1,7	2,4
2 или 6	2 или 1	1,2	1,9	2,6
3 или 7	1 или 2	1,4	2,1	2,8
4 или 8	2 или 1	1,6	2,3	3,0

**ТАБЛИЦА 2 (12 столбцов). Результаты измерений и расчетов  $L = \_\_ \text{ мГн}$**

$C$ , мкФ	50	55	...	100
$\omega_{\text{РЕЗ}}$ , 1/с				
$\omega_0$ , 1/с				
$U_{0C}/\epsilon_0$				
$1/\sqrt{C}$				

**Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.**

### **ИЗМЕРЕНИЯ**

1. Изменяйте величину емкости конденсатора и наблюдайте изменение резонансной кривой.
2. Щелкая мышью по кнопкам соответствующих регуляторов:
  - а)  $R$  – сопротивления резистора,
  - б)  $L$  – индуктивности катушки,зафиксируйте значения, указанные в табл. 2 для вашей бригады.
3. Установите указанное в табл. 1 значение емкости конденсатора.
4. Изменяя величину частоты ЭДС, следите за перемещением отметки на резонансной кривой и числовым значением добротности ( $U_{0C}/\epsilon_0$ ). Добейтесь максимального значения добротности и соответствующие значения частоты источника ЭДС и собственной частоты контура занесите в табл. 2.
5. Повторите измерения для других значений емкости конденсатора из табл. 2.
6. Повторите измерения для двух других значений индуктивности катушки, выбирая их из табл. 1. Полученные результаты запишите в табл. 3 и 4, аналогичные табл.2.

### **ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА**

1. Постройте на одном листе графики зависимости резонансной частоты от корня из обратной емкости при трех значениях индуктивности.
2. Для каждой прямой определите котангенс угла наклона по формуле

$$\operatorname{ctg}\varphi = \frac{\Delta\left(\frac{1}{\sqrt{C}}\right)}{\Delta\omega_{PE3}} \equiv A_{\text{ЭКСП.}}$$

3. Вычислите теоретическое значение константы  $A_{\text{ТЕОР}}$  для каждой прямой по формуле  $A_{\text{ТЕОР}} = \sqrt{L}$ .
4. Заполните таблицу результатов измерений.

Номер измерения	$A_{\text{ЭКСП.}}, \text{Гн}^{1/2}$	$A_{\text{ТЕОР.}}, \text{Гн}^{1/2}$

Сделайте выводы по графикам и результатам измерений.

## Вопросы и задания для самоконтроля

1. Дайте определение вынужденным колебаниям.
2. Что такое колебательный контур?
3. Когда возникают вынужденные гармонические колебания?
4. Как графически изображается комплексная величина?
5. Что такое комплексная амплитуда тока или напряжения?
6. Дайте определение импеданса.
7. Что такое полное электрическое сопротивление?
8. Чему равен импеданс резистора?
9. Чему равен импеданс идеальной катушки индуктивности?
10. Как формулируется закон электромагнитной индукции для катушки?
11. Чему равен импеданс конденсатора?
12. Чему равны реактивные сопротивления катушки и конденсатора?
13. Чему равно реактивное сопротивление последовательно соединенных катушки и конденсатора?
14. Чему равен импеданс колебательного контура?
15. Чему равно полное сопротивление колебательного контура?
16. Дайте определение резонанса для тока в колебательном контуре.
17. На какой частоте наблюдается резонанс для тока в колебательном контуре?
18. На какой частоте наблюдается резонанс для напряжения на конденсаторе в колебательном контуре?
19. Чему равно отношение амплитуд напряжения на конденсаторе при резонансе и ЭДС?
20. Чему равно характеристическое сопротивление контура? Как оно влияет на добротность?
21. Что такое резонансная кривая контура?

## ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 2004. Гл.18, §§ 147, 148.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М.: Высшая школа, 2000. Гл. 28, § 28.3.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

### 2\_4. ДИФРАКЦИЯ И ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ

Ознакомьтесь с теорией в конспекте, учебнике [1,2]. Запустите программу компьютерного моделирования. Выберите «Глава 3. Оптика» и «Модель 3.10. Интерференционный опыт Юнга». Прочитайте краткие теоретические сведения. Оформите конспект.

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- Знакомство с процессом сложения когерентных электромагнитных волн и его моделированием.
- Экспериментальное исследование закономерностей взаимодействия световых волн от двух источников (щелей).

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Между ДИФРАКЦИЕЙ и ИНТЕРФЕРЕНЦИЕЙ нет существенных физических различий. Оба явления заключаются в перераспределении в пространстве энергии светового потока, возникающем в результате суперпозиции волн.

КОГЕРЕНТНОСТЬЮ называется согласованное протекание нескольких колебательных или волновых процессов.

КОГЕРЕНТНЫМИ называются волны, для которых разность фаз возбуждаемых ими колебаний остается постоянной во времени. Когерентными являются гармонические волны с одинаковыми частотами.

ИНТЕРФЕРЕНЦИЕЙ называется устойчивое перераспределение интенсивности, возникающее в результате суперпозиции волн, возбуждаемых конечным количеством дискретных когерентных источников волн.

ДИФРАКЦИЕЙ называется устойчивое перераспределение интенсивности, возникающее в результате суперпозиции волн, возбуждаемых расположенными непрерывно когерентными источниками волн. Одним из проявлений дифракции является распространение волны в область геометрической тени, то есть туда, куда не попадают световые лучи.

ПРИНЦИП ГЮЙГЕНСА: каждый элемент волновой поверхности является источником вторичной сферической волны, а волна в любой точке перед этой поверхностью (с другой стороны от поверхности, нежели реальный источник волны) может быть найдена как результат суперпозиции волн, излучаемых указанными вторичными источниками.

ЗОНАМИ ФРЕНЕЛЯ называются такие участки на поверхности волнового фронта, для которых излучение от двух соседних участков при сложении дает практически нулевой (минимальный) результат (излучение от двух со-

седних зон Френеля компенсируется). Расстояния от краев каждой зоны до точки наблюдения отличаются на  $\lambda/2$ .

Величина напряженности электрического поля  $dE$  электромагнитной волны (ЭМВ), излучаемой элементарным участком площадью  $dS$  волновой поверхности в точке наблюдения, расположенной на расстоянии  $r$  от этого участка, равна

$$dE = K \frac{a_0 dS}{r} \cos(\omega t - kr + \varphi_0),$$

где множитель  $a_0$  определяется амплитудой светового колебания в том месте, где расположена площадка  $dS$ , коэффициент  $K$  зависит от угла между нормалью к площадке  $dS$  и направлением на точку наблюдения,  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число.

Аналогичная формула будет справедлива для любого точечного источника гармонической волны.

Для двух точечных источников (см. рис.1), расположенных на расстоянии  $d$  друг от друга на линии, параллельной экрану, отстоящему от линии источников (1 и 2) на расстоянии  $L$ , максимум при интерференции волн на экране наблюдается при условии, что разность хода  $\Delta r$  волн, приходящих в данную точку, кратна длине волны:  $\Delta r = m\lambda$  ( $m = 0, 1, 2, \dots$ ).

Формула связи  $d \sin\varphi = m\lambda$  для первого максимума при большом расстоянии до экрана  $L \gg d$ , когда

$$\sin\varphi \approx \text{tg}\varphi \approx \frac{X_{\text{MAX}}}{L},$$

преобразуется так:

$$\frac{X_{\text{MAX}} d}{L} = \lambda, \text{ отсюда } X_{\text{MAX}} = \lambda L \frac{1}{d}.$$

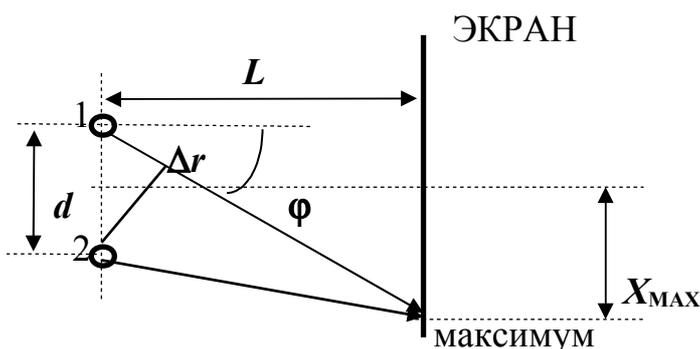


Рис.1. Схема интерференции когерентных волн от двух источников

## МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

Внимательно рассмотрите рисунок, найдите все регуляторы и другие основные элементы.

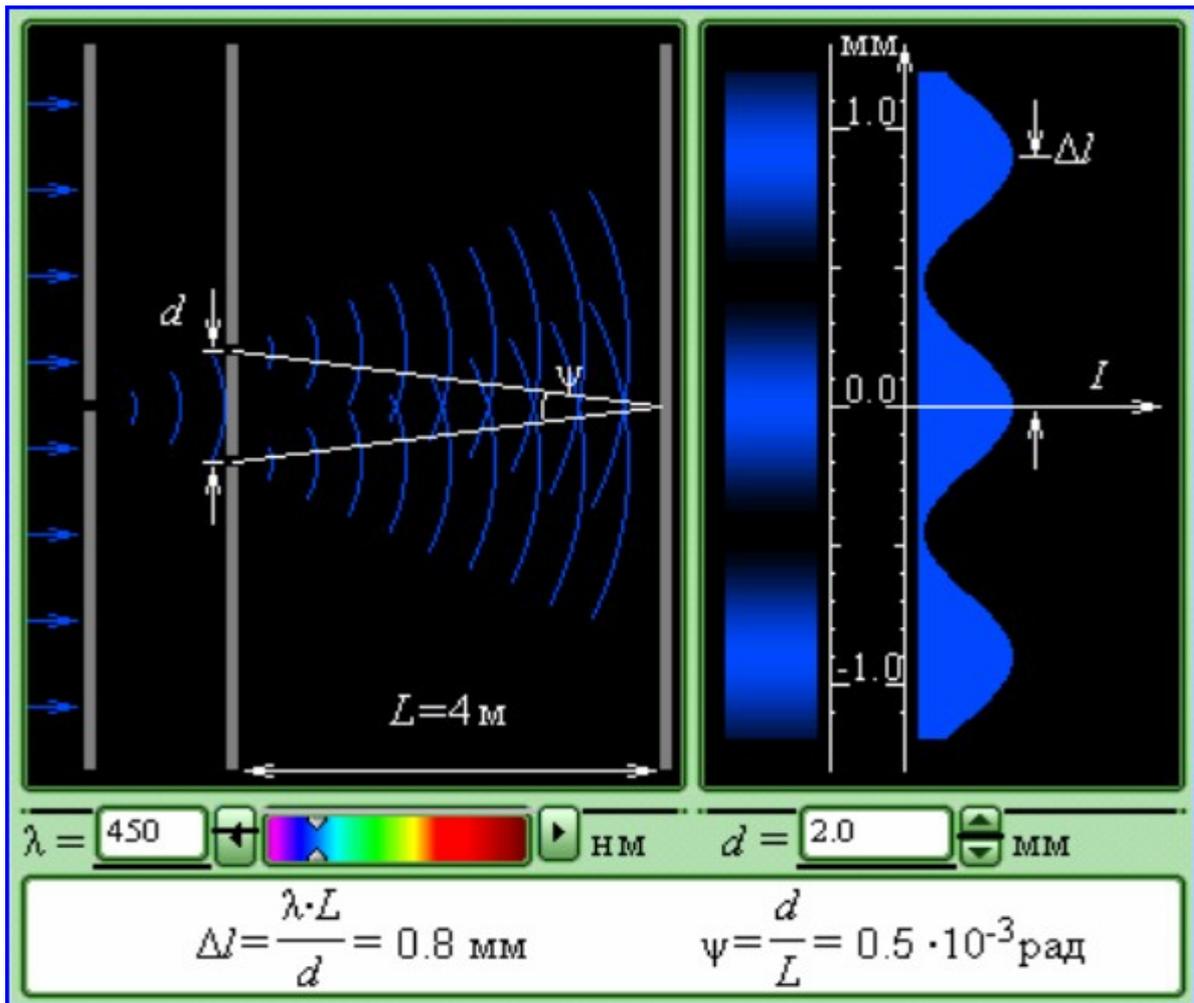


Рис.2. Модель интерференции двух гармонических волн от точечных источников

Зарисуйте необходимое с экрана в свой конспект лабораторной работы.  
**Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.**

### ИЗМЕРЕНИЯ

1. Подведите маркер мыши к движку регулятора на картинке спектра (рис.2). Нажмите левую кнопку мыши и, удерживая ее в нажатом состоянии, двигайте движок, установив числовое значение длины волны  $\lambda_1$ , взятое из табл. 1 для вашей бригады.
2. Щелкая мышью кнопку регулятора  $d$  расстояния между щелями, установите минимальное значение  $d = 1$  мм.
3. Измерьте, используя шкалу на экране, расстояние  $X_{\text{MAX}}$  между нулевым и первым максимумами и запишите в табл. 2.
4. Увеличивая  $d$  каждый раз на 0,3 мм, измерьте еще 9 значений расстояния

$X_{MAX}$ .

5. Устанавливая новые числовые значения длины волны  $\lambda$ , из табл. 1 для вашей бригады, повторите измерения по п. 2, записывая результаты в табл. 3, 4 и 5.

**ТАБЛИЦА 1** (не перерисовывать). **Примерные значения длины волны**

Бригада	1	2	3	4	5	6	7	8
$\lambda_1$	400	405	410	415	420	425	430	435
$\lambda_2$	500	505	510	515	520	525	530	535
$\lambda_3$	580	585	590	595	600	605	610	615
$\lambda_4$	630	635	640	645	650	655	660	665

**ТАБЛИЦЫ 2–5. Результаты измерений при  $\lambda = \underline{\hspace{1cm}}$  нм**

d, мм										
$X_{MAX}$ , мм										
$1/d$ , мм <sup>-1</sup>										

### ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

1. Рассчитайте и внесите в таблицы значения обратного расстояния между щелями  $1/d$ .
2. Постройте на одном рисунке графики экспериментальных зависимостей смещения первого максимума  $X_{MAX}$  от обратного расстояния между щелями (указав на них длину волны  $\lambda$ ).
3. Для каждой линии определите по графику экспериментальное значение произведения  $\lambda L$ , используя формулу

$$\lambda L = \frac{\Delta X_{MAX}}{\Delta \left( \frac{1}{d} \right)} .$$

4. Постройте график зависимости  $\lambda L$  от  $\lambda$ .
5. Найдите значение экспериментально полученного расстояния до экрана  $L$ , используя соотношение

$$L = \frac{\Delta(\lambda L)}{\Delta \lambda} .$$

6. Запишите ответ и проанализируйте ответы и графики.

## Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что такое волна?
2. Что такое гармоническая волна?
3. Что такое длина волны?
4. Напишите математическое условие того, что функция  $f(x, t)$  описывает волну.
5. Что определяет форму волны и направление ее распространения?
6. Напишите математическую функцию, определяющую одномерную гармоническую волну, распространяющуюся в положительном направлении оси  $Ox$ .
7. Как связаны длина волны и ее частота?
8. Что такое когерентность?
9. Что такое свет?
10. Что такое монохроматические волны?
11. Как получают монохроматические волны?
12. Как получают когерентные волны?
13. Могут ли интерферировать монохроматические волны?
14. Дайте определение когерентных волн.
15. Дайте определение явления интерференции.
16. Дайте определение явления дифракции.
17. Что такое волновая поверхность?
18. Сформулируйте принцип Гюйгенса.
19. Дайте определение зон Френеля.
20. Напишите формулу для напряженности электрического поля  $dE$  электромагнитной волны (ЭМВ), излучаемой элементарным участком площадью  $dS$  волновой поверхности в точке наблюдения, расположенной на расстоянии  $r$  от этого участка. Поясните рисунком.
21. Что такое разность хода двух одинаковых гармонических волн, излучаемых двумя источниками?
22. При какой разности хода двух волн при их сложении наблюдается максимум?
23. При какой разности хода двух волн при их сложении наблюдается минимум?

## ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 2004. Гл.22, §§ 171-173.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М.: Высшая школа, 2000. Гл. 31, §§ 31.1-31.3.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

### 2\_5. ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЕТКА

Ознакомьтесь с теорией в конспекте, учебнике. Запустите программу компьютерного моделирования. Выберите «Глава 3. Оптика» и «Модель 3.14. Дифракционная решетка». Прочитайте краткие теоретические сведения. Оформите конспект.

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- Знакомство с процессом сложения когерентных электромагнитных волн и его моделированием.
- Экспериментальное исследование закономерностей взаимодействия световых волн с периодической структурой (дифракционной решеткой).

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Зарисуйте с экрана компьютера то, что расположено в трех прямоугольных рамках.

ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКОЙ называется совокупность большого числа  $N$  одинаковых, отстоящих друг от друга на одно и то же расстояние прямоугольных щелей в плоском непрозрачном экране.

ПЕРИОДОМ (постоянной) дифракционной решетки называется расстояние  $d$  между серединами соседних щелей или сумма ширины щели  $b$  и ширины непрозрачного участка  $a$ .

При анализе излучения, проходящего через решетку, обычно используют линзу и экран, расположенный в фокальной плоскости линзы на расстоянии  $L$  от нее. Линза собирает параллельные лучи в одну точку на экране. Смещение точки на экране зависит от угла падения  $\theta$  лучей на линзу:  $y = L \sin \theta$ . Для очень малых углов

$$\sin \theta \approx \theta \text{ и } y \approx \theta L.$$

РАЗНОСТЬ ХОДА лучей от соседних щелей:

$$\Delta = d \sin \theta.$$

РАЗНОСТЬ ФАЗ лучей от соседних щелей:

$$\delta = 2\pi \frac{\Delta}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} d \cdot \sin \theta.$$

Условие максимума соответствует разности хода, кратной длине волны

$$d \sin(\theta_m) = \pm m\lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots - \text{порядок максимума}).$$

ИНТЕНСИВНОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ, идущего от решетки под углом  $\theta$

$$I_{\text{РЕШ}} = I_0 \frac{\sin^2\left(\frac{\pi b \sin \vartheta}{\lambda}\right)}{\left(\frac{\pi b \sin \vartheta}{\lambda}\right)^2} \frac{\sin^2\left(\frac{N\pi d \sin \vartheta}{\lambda}\right)}{\sin^2\left(\frac{\pi d \sin \vartheta}{\lambda}\right)},$$

где  $I_0$  – интенсивность, создаваемая одной щелью против центра линзы,  $b$  – ширина щели.

Первый множитель обращается в ноль в точках, для которых

$$b \sin\theta_k = \pm k\lambda \quad (k = 1, 2, \dots).$$

Поскольку обычно ширина  $b$  щели много меньше постоянной решетки  $d$  (расстояния между центрами щелей), ширина нулевого максимума достаточно велика и можно не учитывать влияния первого сомножителя.

Второй множитель принимает значение  $N^2$  в точках, удовлетворяющих условию

$$d \sin(\theta_m) = \pm m\lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots),$$

$$y_m = \vartheta_m L = \pm m \frac{\lambda}{d} L = \pm m \frac{\lambda F}{d}.$$

Последнее условие определяет положение ГЛАВНЫХ МАКСИМУМОВ излучения после прохождения через дифракционную решетку, а  $m$  называется порядком максимума. Интенсивность в главном максимуме преобразуем, раскладывая синус в ряд и ограничиваясь первыми двумя членами разложения:

$$I_m = N^2 I_0 \frac{\sin^2\left(\frac{\pi b \sin \vartheta}{\lambda}\right)}{\left(\frac{\pi b \sin \vartheta}{\lambda}\right)^2} = I_{0N} \frac{\sin^2\left(m\pi \frac{b}{d}\right)}{\left(m\pi \frac{b}{d}\right)^2} = I_{0N} \left[1 - \frac{1}{6} \left(m\pi \frac{b}{d}\right)^2\right]^2.$$

Обозначим  $R_m = \frac{I_m}{I_{0N}}$ . Отношение  $R_m$  интенсивности в  $m$ -м максимуме к интенсивности в нулевом максимуме называется «относительной интенсивностью  $m$ -го максимума». Формулу

$$\sqrt{R_m} = 1 - \frac{1}{6} (m\pi b)^2 \left(\frac{1}{d}\right)^2$$

можно проверить экспериментально и из соответствующего графика получить ширину щели.

## МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

Закройте окно теории. Внимательно рассмотрите рис.1, найдите все регуляторы и другие основные элементы и зарисуйте их в конспект.

При включении программы моделирования автоматически устанавливаются следующие параметры: порядок максимума  $m = 1$ , длина волны 0,45 мкм, расстояние между щелями  $d = 20$  мкм.

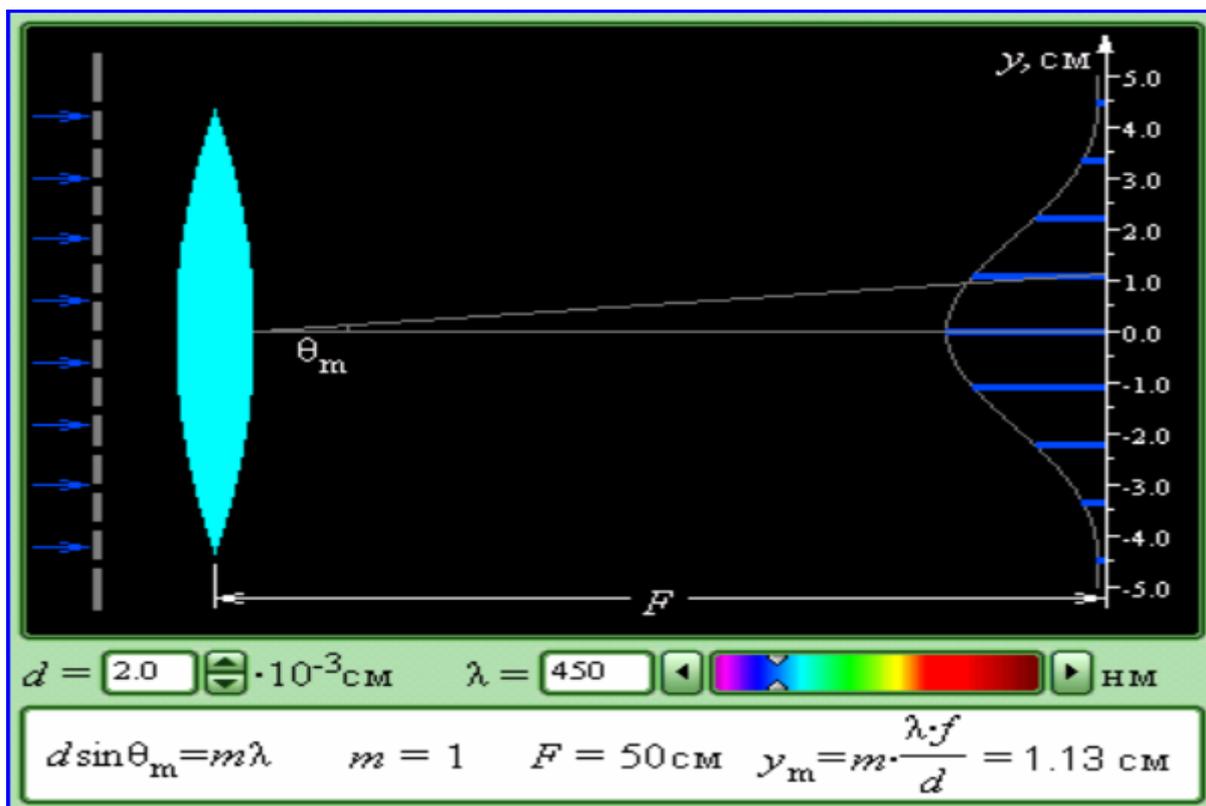


Рис.1. Модель дифракционной решетки.

Нажимая левую кнопку мыши, установив ее маркер на дифракционной картине, меняйте  $m$  от 0 до 3 и наблюдайте изменение числового значения координаты максимума на экране. Установите длину волны излучения, соответствующую желтому цвету, и, меняя  $m$  и  $d$ , снова наблюдайте картину интерференции.

**Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.**

**ЭКСПЕРИМЕНТ** Исследование интерференционной картины.

1. Установите расстояние между щелями  $d = 20$  мкм.
2. Подведите маркер мыши к кнопке на спектре и нажмите левую кнопку мыши. Удерживая кнопку в нажатом состоянии, перемещайте ее до тех

пор, пока над спектром не появится значение длины волны, равное взятому из табл. 1 для вашей бригады

3. Измерьте линейкой на экране монитора длины светящихся отрезков, соответствующих интенсивности максимумов на дифракционной картине. Запишите значения интенсивности в табл. 2.
4. Увеличивая  $d$  на 1 мкм, повторите измерения по п. 3
5. Установив новое значение длины волны из табл. 1 повторите измерения, записывая результаты в табл. 3.

**ТАБЛИЦА 1 (не перерисовывать). Примерные значения длины волны.**

Бригада	1	2	3	4	5	6	7	8
$\lambda_1$ , нм	400	410	420	430	440	450	460	470
$\lambda_2$ , нм	600	610	620	630	640	650	660	670

**ТАБЛИЦЫ 2, 3. Результаты измерений и расчетов при  $\lambda = \underline{\hspace{1cm}}$  нм.**

$d$ , мкм	20	21	22	23	24	25	26	28	30
$1/d^2$ , $10^{10} \text{ м}^{-2}$									
$I_{0N}$ , мм									
$I_1$ , мм									
$I_2$ , мм									
$I_3$ , мм									
$I_4$ , мм									
$\sqrt{R_1}$									
$\sqrt{R_2}$									
$\sqrt{R_3}$									
$\sqrt{R_4}$									

### **ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА**

1. Вычислите и запишите в табл. 2 и 3 необходимые параметры.
2. Постройте по табл. 2 на одном рисунке графики экспериментальных зависимостей корня из относительной амплитуды от квадрата обратного периода решетки для всех максимумов (указав на них номер максимума).
3. На втором рисунке постройте результаты по табл. 3.
4. По наклону каждого графика определите экспериментальное значение ширины щели, используя формулу

$$b = \frac{\sqrt{6}}{m\pi} \sqrt{\frac{\Delta(\sqrt{R_m})}{\Delta\left(\frac{1}{d^2}\right)}} .$$

5. Вычислите среднее значение ширины щели, проанализируйте ответы и графики.

*Истинное значение  $b = 5$  мкм.*

### Вопросы и задания для самоконтроля

1. Дайте определение световой волны.
2. Дайте определение гармонической волны.
3. Дайте определение электромагнитной волны.
4. Напишите формулу зависимости напряженности электрического поля от времени и координаты для одномерной гармонической ЭМВ, распространяющейся вдоль оси  $OX$ .
5. Какие волны называются когерентными?
6. Дайте определение дифракции.
7. Что такое дифракционная решетка?
8. Для каких целей используется дифракционная решетка?
9. Что мы увидим, если в дифракционной решетке закрыть все щели, кроме одной?
10. Что такое постоянная дифракционной решетки?
11. Зачем между дифракционной решеткой и экраном ставится собирающая линза?
12. Напишите формулу разности хода лучей, идущих от двух соседних щелей дифракционной решетки.
13. При какой разности хода лучей от соседних щелей решетки наблюдается максимум при их сложении?
14. При какой разности хода лучей от соседних щелей решетки наблюдается минимум при их сложении?
15. Напишите формулу разности фаз лучей от соседних щелей.
16. Как формируются главные максимумы дифракционной картины?
17. Нарисуйте, как распространяется после решетки одна плоская гармоническая волна, падающая перпендикулярно плоскости решетки.
18. Нарисуйте, как будут распространяться после решетки две плоские гармонические волны с близкими длинами волн, падающие перпендикулярно плоскости решетки.
19. Можно ли сделать дифракционную решетку для радиолокационной волны? Как она будет отличаться от обычной дифракционной решетки для видимого света?

20. Применяются ли дифракционные решетки в радиолокации?
21. Как подобрать длину волны локатора, использующего дифракционную решетку на борту самолета?

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 2004. Гл.23, §§ 179, 180.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М.: Высшая школа, 2000. Гл. 32, §§ 32.3, 32.4.

## НЕКОТОРЫЕ ПОЛЕЗНЫЕ СВЕДЕНИЯ

### ФИЗИЧЕСКИЕ КОНСТАНТЫ

Название	Символ	Значение	Размерность
Гравитационная постоянная	$\gamma$ или $G$	$6,67 \cdot 10^{-11}$	$\text{Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-2}$
Ускорение свободного падения на поверхности Земли	$g_0$	9,8	$\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$
Скорость света в вакууме	$c$	$3 \cdot 10^8$	$\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$
Постоянная Авогадро	$N_A$	$6,02 \cdot 10^{26}$	$\text{кмоль}^{-1}$
Универсальная газовая постоянная	$R$	$8,31 \cdot 10^3$	$\text{Дж} \cdot \text{кмоль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$
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
Постоянная Фарадея	$F$	$9,65 \cdot 10^4$	$\text{Кл} \cdot \text{моль}^{-1}$
Электрическая постоянная	$\epsilon_0$	$8,85 \cdot 10^{-12}$	$\text{Ф} \cdot \text{м}^{-1}$
Магнитная постоянная	$\mu_0$	$4\pi \cdot 10^{-7}$	$\text{Гн} \cdot \text{м}^{-1}$
Постоянная Планка	$h$	$6,62 \cdot 10^{-34}$	$\text{Дж} \cdot \text{с}$

### 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	$10^{-12}$