

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**  
**«МОСКОВСКИЙ ИНСТИТУТ СТАЛИ И СПЛАВОВ»**

Кафедра физики

**В.А.Степанова**

**ФИЗИКА. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ**

Описание лабораторных работ

с использованием компьютерных моделей

Москва 2010

## Лабораторная работа № 2 – 02к

### ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Компьютерная модель «Цепи постоянного тока»  
в сборнике компьютерных моделей «Открытая физика»  
раздел «Электричество и магнетизм»

#### Цель работы

- Знакомство с компьютерным моделированием цепей постоянного тока.
- Экспериментальное подтверждение правил Кирхгофа.

#### Методика виртуального эксперимента

В данной работе используется компьютерная модель, основанная на законе Ома для замкнутой цепи: *сила тока в замкнутой цепи прямо пропорциональна ЭДС, действующей в цепи, и обратно пропорциональна сумме электрических сопротивлений внешнего и внутреннего участков цепи:*

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}, \quad (1)$$

где  $\mathcal{E}$  – ЭДС (электродвижущая сила),  $R$  — внешнее сопротивление,  $r$  — внутреннее сопротивление источника тока (*в компьютерной модели внутренним сопротивлением пренебрегают в виду его малости*).

Электрические цепи, как правило, содержат несколько замкнутых контуров. Контуров могут иметь общие участки, в каждом из которых может быть включено по несколько источников тока и т. д. Расчет подобных цепей возможен с помощью закона Ома и закона сохранения энергии, но достаточно сложен. Для

разветвленных электрических цепей Кирхгоф предложил два правила, которые значительно упрощают процесс их расчета.

**Первое правило Кирхгофа:** *Алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю:*

$$\sum_k I_k = 0 \quad (2)$$

*Любую точку разветвления цепи, в которой сходится более трех проводников с током, называют узлом.* Токи, входящие в узел, берутся с одним знаком (считаются положительными), а токи, выходящие из узла, берутся с противоположным знаком (считаются отрицательными).

**Второе правило Кирхгофа:** *в любом, произвольно выбранном, замкнутом контуре разветвленной электрической цепи, алгебраическая сумма произведений сил токов на сопротивления соответствующих участков этого контура  $I_k R_k$  равна алгебраической сумме ЭДС  $\mathcal{E}_n$ , включенных в этот замкнутый контур:*

$$\sum_k I_k R_k = \sum_n \mathcal{E}_n \quad (3)$$

При расчете сложных цепей постоянного тока с применением правил Кирхгофа необходимо: 1) Выбрать произвольное направление токов на всех участках цепи. 2) Выбрать направление обхода контура и строго его придерживаться: произведение  $I_k R_k$  положительно, если ток на данном участке совпадает с направлением обхода; ЭДС  $\mathcal{E}_n$ , действующие по выбранному направлению обхода, считаются положительными, против — отрицательными. 3) Составить столько уравнений, чтобы их число было равно числу искомых величин (в систему уравнений должны входить все сопротивления

и ЭДС рассматриваемой цепи); каждый рассматриваемый контур должен содержать хотя бы один элемент, не содержащийся в предыдущих контурах, иначе получатся уравнения, являющиеся простой комбинацией уже составленных.

В данной лабораторной работе исследуется модель простейшей разветвленной электрической цепи, состоящей из трех источников ЭДС  $\mathcal{E}_i$  с внутренними сопротивлениями  $r_i$ , подключенных к одному резистору (нагрузке)  $R$  (схема 1 на рис.1).

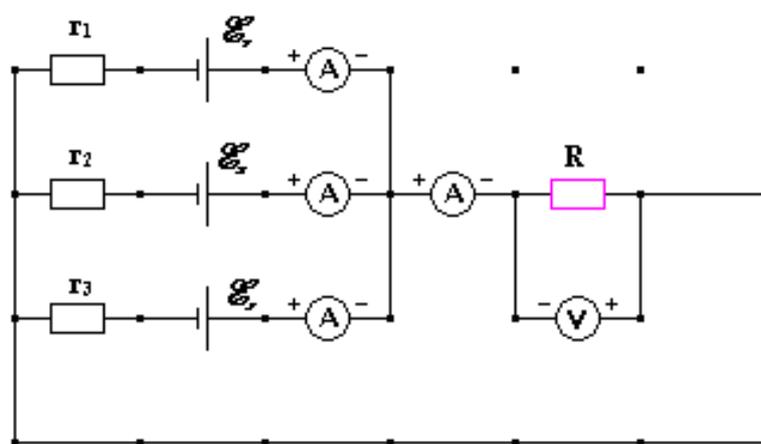


Рис.1. Схема 1 электрической цепи для проверки правил Кирхгофа.

Откройте компьютерную модель «Цепи постоянного тока». Внимательно рассмотрите модель, найдите все регуляторы и другие основные элементы. Рассмотрите, какой значок на панели установки значений соответствует элементу электрической цепи (соединительные провода, источник тока, резистор, вольтметр и амперметр) и зарисуйте их в конспект. При открытии компьютерной модели рабочее поле помечено точками, между которыми возможно размещать элементы электрической цепи (рис.2).

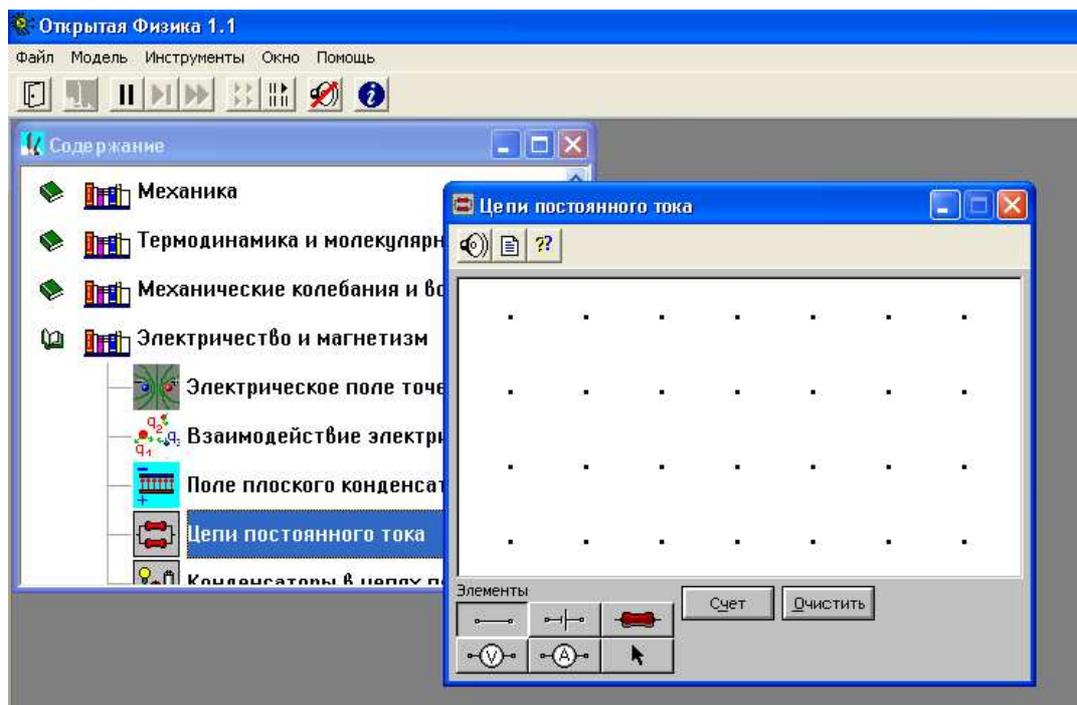


Рис. 2. Окно компьютерной модели «Цепи постоянного тока».

Соберите на чистом экране компьютерной модели простейшую электрическую цепь. Для примера соберите цепь, изображенную на рис. 3 (для измерения силы тока амперметр (A) подключают к проводнику последовательно, для измерения напряжения вольтметр (V) подключают к проводнику параллельно).

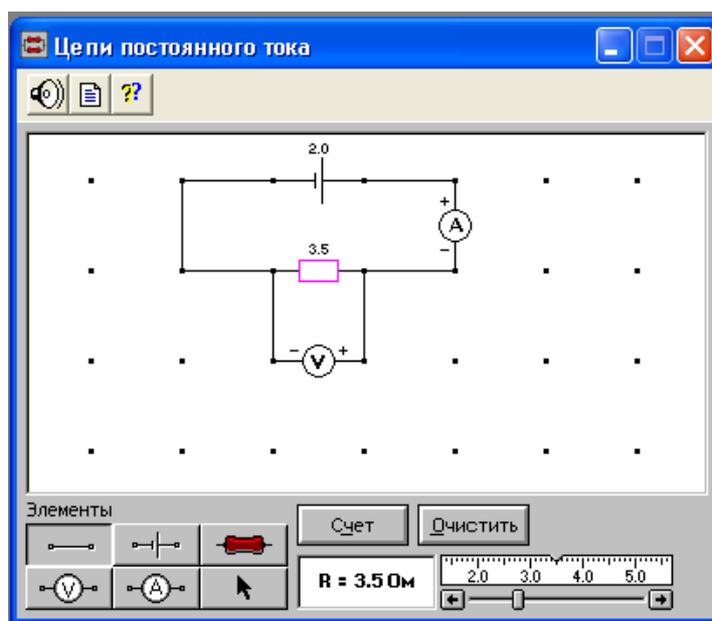


Рис. 3. Компьютерная модель «Цепи постоянного тока» в режиме сборки цепи и установки значений э.д.с.  $\mathcal{E}_n$  и сопротивлений  $r_n$ .

Для установления источника тока сначала щелкните левой кнопкой мыши в нижней левой части экрана на кнопку э.д.с.. Переместите маркер мыши на рабочую часть экрана, где расположены точки. Щелкните левой кнопкой мыши в рабочей части экрана, где будете размещать источник тока (э.д.с.). После этого появится изображение источника тока и цифры 1.0 над ним. ***Всегда при размещении источника тока модель автоматически устанавливает значение его э.д.с. равное 1.0 В.*** В нижней правой части экрана компьютерной модели размещена масштабная линейка, с помощью которой можно задавать необходимое значение э.д.с. источника тока. Для установления необходимого значения  $\mathcal{E}$  (э.д.с.) щелкните левой кнопкой мыши на кнопке со стрелкой. Подведите маркер мыши к движку регулятора значений э.д.с.. Нажмите левую кнопку мыши и, удерживая ее в нажатом состоянии, меняйте величину параметра до установления необходимого числового значения (например, 2.0 В).

Для установления резистора (проводника) щелкните левой кнопкой мыши в нижней левой части экрана на кнопку резистора. Переместите маркер мыши на рабочую часть экрана, где расположены точки. Щелкните левой кнопкой мыши в рабочей части экрана, где будете размещать резистор. После этого появится изображение резистора и цифры 1.0 над ним. ***Всегда при размещении резистора модель автоматически устанавливает значение его сопротивления равное 1.0 Ом.*** В нижней правой части экрана компьютерной модели размещена масштабная линейка, с помощью которой можно задавать необходимое значение сопротивления. Для установления необходимого значения  $R$  щелкните левой кнопкой мыши на кнопке со стрелкой. Подведите маркер мыши к движку регулятора значений  $R$ . Нажмите левую кнопку мыши и, удерживая ее в нажатом состоянии, меняйте величину параметра до установления необходимого числового значения (например, 3.5 Ом).

Для установления амперметра (или вольтметра) щелкните левой кнопкой мыши в нижней левой части экрана на соответствующую кнопку. Переместите маркер мыши на

рабочую часть экрана, где расположены точки. Щелкните левой кнопкой мыши в рабочей части экрана, где будете размещать амперметр или вольтметр. После этого появится изображение соответствующего элемента. В обозначении измерительных приборов (амперметра и вольтметра) на схеме в компьютерной модели символы «+» и «-» обозначают полярность подключения.

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. Готовая электрическая схема показана на рис.3. *в режиме сборки цепи и установки значений необходимых параметров - при этом режиме значения измеряемых величин (ток и напряжение) не показаны.*

В компьютерной модели есть две кнопки: «Счет» и «Очистить». Нажатие кнопки «Очистить» дает чистое рабочее поле компьютерной модели. **Нажатие кнопки «Счет» позволяет снять показания измерительных элементов электрической цепи – амперметра и вольтметра.** Например, собранная ранее схема (рис.3) после нажатия кнопки «Счет» показывает значения тока 0.57А и напряжения 2.00 В (рис. 4).

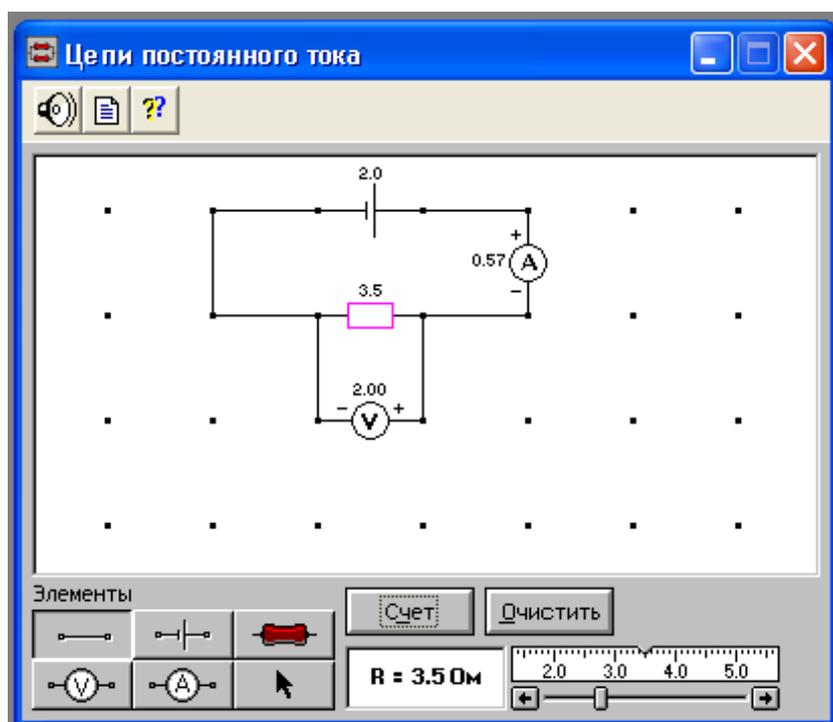


Рис. 4. Компьютерная модель «Цепи постоянного тока» в режиме «Счет».

Компьютерная модель «Цепи постоянного тока» позволяет: а) вносить изменения в электрическую схему и б) изменять значения э.д.с.  $\mathcal{E}$  и сопротивлений  $R$  уже созданной схемы.

Для внесения изменений необходимо подвести маркер мыши к тому месту электрической цепи, в котором необходимо заменить элемент цепи и один раз щелкнуть левой кнопки мыши – это приводит к уничтожению элемента; далее устанавливают элементы цепи и их численные значения, как описано выше.

*Изменять значения э.д.с.  $\mathcal{E}$  и сопротивлений  $R$  уже созданной схемы можно при активном режиме элемента, когда элемент на схеме в компьютерной модели окрашен в красный цвет и внизу справа открыта шкала возможных значений этого элемента.* Для установления необходимого значения подведите маркер мыши к движку регулятора значений элемента, нажмите левую кнопку мыши и, удерживая ее в нажатом состоянии, меняйте величину параметра до установления необходимого числового значения, величина которого указывается на экране модели возле элемента.

*Ввести элемент в активный режим возможно следующими действиями: нажать маркер мыши на кнопку обозначения элемента, нажать маркер мыши на кнопку обозначения стрелочки, нажать маркер мыши на элемент в схеме компьютерной модели.*

## Порядок выполнения работы

1. Нарисуйте в конспекте схему электрической цепи (рис.1). Укажите знаки э.д.с., направления токов в каждом участке и направления обхода каждого замкнутого контура, укажите узел. Используя правила Кирхгофа, составьте систему уравнений для нахождения токов в каждом участке замкнутой цепи, т.е. для вычисления  $I$ ,  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ .

2. Откройте компьютерную модель «Цепи постоянного тока». Соберите на чистом экране компьютерной модели заданную электрическую цепь (рис.1), устанавливая значения источников ЭДС  $\mathcal{E}_i$  и их внутренние сопротивления  $r_i$ , взяв их из таблицы 1 для вашего варианта.

3. Установите сопротивление резистора нагрузки (например,  $R = 1$  Ом). Измерьте значения всех токов и напряжения на нагрузке (щелкнув мышью по кнопке «Счет») и запишите их в таблицу 2.

4. Изменяя сопротивление нагрузки  $R$ , повторите измерения параметров токов и напряжения и запишите их в таблицу 2 (значения  $R$  брать из таблицы 2: для четных вариантов  $R$  принимает четные значения, для нечетных вариантов  $R$  принимает нечетные значения).

Таблица 1.

**Значения ЭДС и внутренних сопротивлений (не перерисовывать).**

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \mathcal{E}_3$	3, 7,	4, -3,	3, 6,	5, -2,	-6, 5,	5, 8,	-4, 6,	8, -4,	4, 7,	6, -1,
(В)	-2	-8	-4	-8	8	-4	-7	6	-3	-4
$r_1, r_2, r_3$	2,1,1	1,3,1	2,1,2	1,1,2	2,1,1	1,2,1	1,1,2	1,3,1	1,2,1	2,1,1
(Ом)										

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					

### Результаты расчета

R (Ом)	I <sub>1</sub> (А)	I <sub>2</sub> (А)	I <sub>3</sub> (А)	I (А)

### Обработка результатов измерений

1. Используя систему уравнений для нахождения токов  $I$ ,  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  в каждом участке замкнутой цепи (см. пункт 1 в **Порядке выполнения работы**), рассчитайте значения всех токов для каждого сопротивления нагрузки и запишите их в таблицу 3. Сравните их с результатами измерений (таблица 2).

2. Постройте график экспериментальной зависимости падения напряжения  $U$  на нагрузке при разных значениях сопротивления  $R_i$  от тока  $I$  через неё.

3. Сформулируйте выводы по графику.

### Библиографический список

#### *Основной*

*Савельев И. В.* Курс общей физики: В 5 кн. М: АСТ: Астрель, 2006. Кн. 2.

*Капуткин Д.Е., Шустиков А.Г.* Физика. Обработка результатов измерений при выполнении лабораторных работ. (№ 805). М.: МИСиС. «Учеба». 2007.

#### *Дополнительный*

*Калашников С.Г.* Электричество. Физматлит, 2006.

*Сивухин Д.В.* Общий курс физики. Физматлит, 2004. Т.2.

## Контрольные вопросы

1. Что такое электрический ток? Дайте определение силы тока. В каких единицах измеряют силу тока в СИ?
2. Что называют напряжением  $U$  на участке цепи? Что такое э.д.с.? В каких единицах измеряют напряжение и э.д.с. в СИ?
3. Нарисуйте: а) однородный участок цепи; б) неоднородный участок цепи; в) замкнутую цепь. Запишите закон Ома для этих цепей и поясните физический смысл величин в записанных формулах.
4. Что такое узел электрической цепи? Сформулируйте первое правило Кирхгофа. Какое свойство электрических зарядов он отражает? Запишите формулу для первого правила Кирхгофа и поясните её на примере.
5. Сформулируйте второе правило Кирхгофа. Запишите формулу для него и поясните её на примере.
6. Задача. К батарее из двух параллельно включенных элементов с ЭДС  $\mathcal{E}_1$  и  $\mathcal{E}_2$  и внутренними сопротивлениями  $r_1$  и  $r_2$  подключен резистор с сопротивлением  $R$ . Найти ток  $I$ , текущий через резистор  $R$ , и токи  $I_1$  и  $I_2$  в первом и втором элементах. При каких условиях токи в отдельных цепях могут быть равными нулю?

## Лабораторная работа № 2 -03к

### МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПРЯМОГО ТОКА

Компьютерная модель «Магнитное поле прямого тока»  
в сборнике компьютерных моделей «Открытая физика»  
раздел «Электричество и магнетизм»

#### Цель работы

- Знакомство с компьютерным моделированием магнитного поля.
- Экспериментальное подтверждение закономерностей для магнитного поля прямого провода с током.
- Экспериментальное определение величины магнитной постоянной.

#### Методика виртуального эксперимента

В данной работе используется компьютерная модель, основанная на том, что силовое магнитное поле изображают с помощью *линий магнитной индукции* — *воображаемых линий, в любой точке которых вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  направлен по касательной к ним.*

Силовые линии магнитного поля имеют вид концентрических окружностей, центром которых является проводник с током (источник магнитного поля), и по силовым линиям в магнитном поле располагаются железные опилки или оси маленьких магнитных стрелок. Направление силовых линий определяется *правилом векторного произведения (правилом правого винта): если поступательное движение винта соответствует направлению тока в проводнике, то направление вращения винта задает направление линий магнитной индукции (силовых линий магнитного поля).*

Величина индукции магнитного поля  $B$ , возникшего вокруг прямого тока силой  $I$  в любой точке на расстоянии  $r$  от проводника, вычисляется по формуле:

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

Индукция магнитного поля прямого тока в некоторой точке прямо пропорциональна силе этого тока и обратно пропорциональна расстоянию от этой точки до проводника с током.

Из формулы (1) следует, что чем ближе к проводнику с током, тем больше магнитная индукция и тем гуще располагаются магнитные линии.

В формуле (1)  $\mu_0 = 1.26 \cdot 10^{-6} \text{ Н/А}^2$  (или Гн/м) — магнитная постоянная, величина которой зависит только от выбора системы единиц (здесь она дана в СИ),  $\mu$  — относительная магнитная проницаемость среды, в которой располагается проводник с током (для вакуума или воздуха  $\mu = 1$ ).

Перепишав формулу (1)  $\mu = 1$  в виде

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

можно сделать вывод, что для постоянного значения силы тока ( $I = \text{const}$ ) величина магнитной индукции магнитного поля прямого тока  $I$  линейно зависит от величины обратного расстояния от оси прямого тока  $B = f\left(\frac{1}{r}\right)$ , что позволяет экспериментально определить величину магнитной постоянной  $\mu_0$ , воспользовавшись формулой

$$\mu_0 = \frac{2\pi}{I} \frac{\Delta B}{\Delta\left(\frac{1}{r}\right)}, \quad (3)$$

где  $\Delta B$  - это приращение функции при соответствующем приращении аргумента  $\Delta\left(\frac{1}{r}\right)$ .

Откройте компьютерную модель «Магнитное поле прямого тока». Внимательно рассмотрите модель, найдите все регуляторы и другие основные элементы. (Если вы

забыли, как работать с системой компьютерного моделирования, прочитайте ВВЕДЕНИЕ ещё раз).

Установите любое значение величины силы тока  $I$  (величину силы тока  $I$  можно менять от 0 до 20А) и посмотрите изображение магнитного поля при флажках «Силловые линии» и «Железные опилки». Зарисуйте поле эксперимента в конспект. Не изменяя величину тока, поменяйте направление тока (например, значение величины тока  $I = 5А$  измените на  $I = -5А$ ) и посмотрите изображение магнитного поля при флажках «Силловые линии» и «Железные опилки». Сделайте вывод (что изменилось в поле компьютерной модели и почему?).

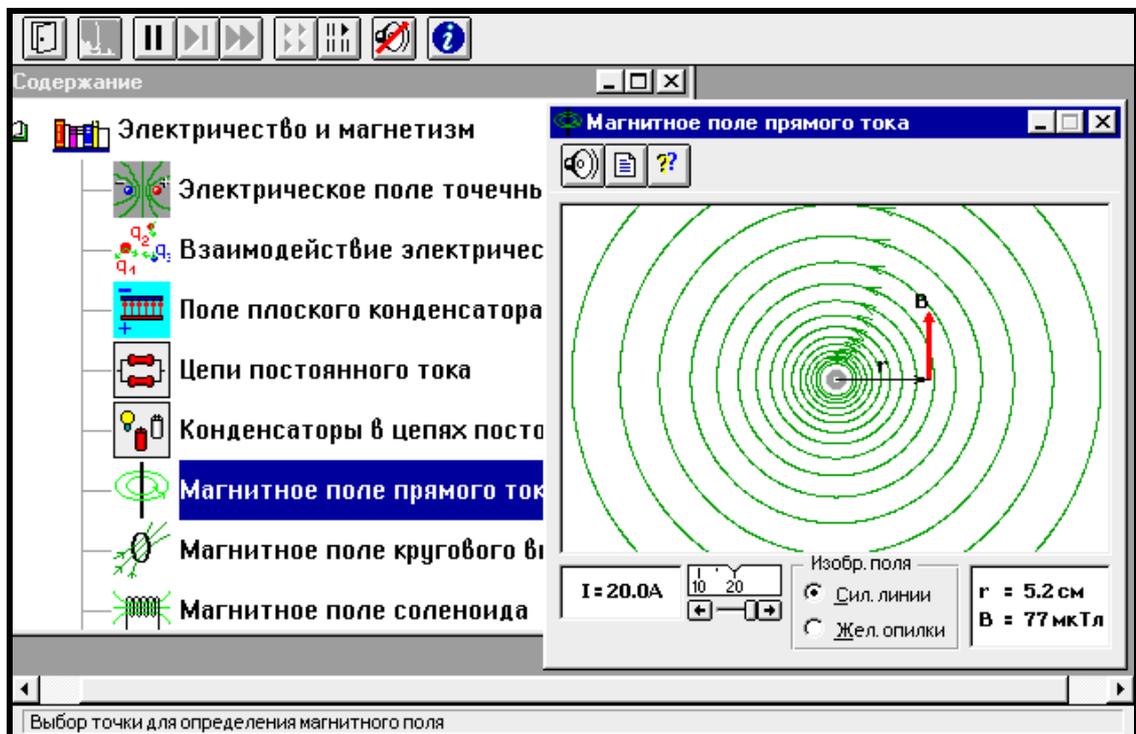


Рис. 1. Окно компьютерной модели «Магнитное поле постоянного тока».

Точка поля для исследования магнитного поля выбирается установкой мыши в поле эксперимента, при этом на экране появляется изображение руки, которую нужно перемещать в заданном направлении на необходимое расстояние, а в правом нижнем углу экрана модели указывается численное значение расстояния и величины индукции магнитного поля. Например, для  $I = 20А$  на расстоянии  $r = 5.2$  см величина индукции магнитного поля  $B = 77$  мкТл.

## Порядок выполнения работы

1. Запустите, дважды щелкнув мышью, виртуальный эксперимент «Магнитное поле прямого тока». Выберите режим "Силовые линии".

**Все эксперименты необходимо выполнять при установленном флажке «Силовые линии».**

2. Зацепив мышью, перемещайте движок регулятора тока. Зафиксируйте величину тока  $I_1$ , указанную в таблице 1 для вашего варианта.

3. Перемещая мышью «руку» вблизи провода, нажмите левую кнопку мыши на расстоянии  $r = 2\text{ см}$  до оси провода (значения расстояния  $r$  указаны в таблице 2).

4. Запишите значение величины индукции магнитного поля  $B_1$  в таблицу 2.

5. Устанавливая расстояния от оси провода 4, 6, 8 и 10 см, измерьте величину индукции магнитного поля  $B_1$  и запишите полученные значения в таблицу 2.

6. Повторите измерения для трех других значений тока из таблицы 1.

*Таблица 1.*

### Значения величины тока (не перерисовывать).

Вариант Значения $I_i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_1, \text{ A}$	10	5	15	-20	-10	-5	20	5	-15	-20
$I_2, \text{ A}$	-5	10	20	-15	-5	-10	15	20	-10	20
$I_3, \text{ A}$	20	15	-10	-5	15	-15	-10	-10	5	-10
$I_4, \text{ A}$	-15	20	5	-10	20	-20	-5	-15	10	-5

### Результаты измерений магнитной индукции

r, см	2	4	6	8	10
1/ r, м <sup>-1</sup>					
B <sub>1</sub> , Тл					
B <sub>2</sub> , Тл					
B <sub>3</sub> , Тл					
B <sub>4</sub> , Тл					

### Обработка результатов измерений

1. Вычислите и запишите в таблицу 2 значения для второй строки (обратите внимание на размерности величин в строках).

2. Постройте на одном листе графики зависимости индукции магнитного поля (B) прямого провода с током от обратного расстояния (1/r) от оси провода для каждого тока.

3. Определите магнитную постоянную (для *каждого графика*), используя формулу

$$\mu_0 = \frac{2\pi}{I_i} \frac{\Delta B}{\Delta\left(\frac{1}{r}\right)}, \quad (4)$$

где  $I_i$  - величина силы тока,  $\Delta B$  и  $\Delta\left(\frac{1}{r}\right)$  - приращение функции и аргумента для этого тока.

4. Вычислите среднее значение магнитной постоянной, абсолютную и относительную ошибки.

5. Запишите результат определения величины магнитной постоянной и сравните его с табличным значением.

6. Проанализируйте графики.

## Библиографический список

### *Основной*

*Савельев И. В.* Курс общей физики: В 5 кн. М: АСТ: Астрель, 2006. Кн. 2.

*Капуткин Д.Е., Шустиков А.Г.* Физика. Обработка результатов измерений при выполнении лабораторных работ. (№ 805). М.: МИСиС. «Учеба». 2007.

### *Дополнительный*

*Калашиников С.Г.* Электричество. Физматлит, 2006.

*Сивухин Д.В.* Общий курс физики. Физматлит, 2004. Т.2.

## Контрольные вопросы

1. Что такое магнитное поле? Назовите источники магнитного поля.
2. Запишите закон Био-Савара-Лапласа и поясните физический смысл величин, в него входящих (используйте для этого рисунок).
3. Нарисуйте силовые линии (с указанием их направлений) и запишите формулу вычисления магнитной индукции для магнитного поля: а) прямого провода с током; б) кругового витка (контур) с током в центре витка.
4. Сформулируйте принцип суперпозиции для магнитных полей.
5. Задача. Бесконечно длинный провод образует круговой виток, касательный к проводу. По проводу идет ток  $I = 5$  А. Найти радиус витка, если напряженность магнитного поля в центре витка  $H = 41$  А/м.

## Лабораторная работа № 2 – 05к

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЧАСТИЦЫ МЕТОДОМ ОТКЛОНЕНИЯ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Компьютерные модели "Движение заряда в электрическом поле",  
"Движение заряда в магнитном поле", "Масс - спектрометр"  
в сборнике компьютерных моделей «Открытая физика»  
раздел «Электричество и магнетизм»

### Цель работы

- Знакомство с компьютерным моделированием движения заряженных частиц в электрическом, магнитном и электромагнитном полях.
- Ознакомление с принципом работы масс – спектрометра.
- Определение удельного заряда частиц.

### Методика виртуального эксперимента

В данной работе используются компьютерные модели, основанные на движении заряженной частицы в электрическом поле, движении заряженной частицы в магнитном поле и движении заряженной частицы в электромагнитном поле.

*Электрическое поле.* Сила, действующая на любой заряд  $q$ , размещенный в данную точку поля, со стороны электрического поля, вычисляется по формуле

$$\vec{F}_e = q\vec{E}, \quad (1)$$

где  $\vec{E}$  - вектор напряженности в той точке электрического поля, в которую помещен заряд  $q$ . Так как заряд  $q$  – это скалярная постоянная величина, то направление

вектора силы  $\vec{F}$  определяется направлением вектора напряженности электрического поля  $\vec{E}$  и зависит от знака заряда:

- если заряд  $q > 0$ , то вектор силы  $\vec{F}$  направлен параллельно вектору напряженности электрического поля  $\vec{E}$  в то же сторону, что и вектор  $\vec{E}$ ;
- если заряд  $q < 0$ , то вектор силы  $\vec{F}$  направлен параллельно вектору напряженности электрического поля  $\vec{E}$  в обратную сторону от вектора  $\vec{E}$ .

Сила, действующая на частицу в однородном электрическом поле, везде одинакова, поэтому неизменным будет и ускорение частицы, определяемое вторым законом Ньютона (при малых скоростях движения частицы  $V \ll c$ , где  $c$  – это скорость света в вакууме). Рассмотрим случай, когда сила тяжести заряженной частицы (в частности, электрона) много меньше силы электрического поля.

Тогда, согласно второму закону Ньютона, уравнение движения частицы имеет вид

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = q\vec{E}. \quad (2)$$

Написанное векторное уравнение распадается на три скалярных, каждое из которых описывает движение вдоль соответствующей координатной оси. В дальнейшем мы будем интересоваться только некоторыми частными случаями движения.

Предположим, что заряженная частица, двигаясь первоначально вдоль оси  $OX$  со скоростью  $\vec{V}_0$ , влетает в электрическое поле плоского конденсатора параллельно его пластинам. Если расстояние между пластинами мало по сравнению с их длиной  $L$ , то краевыми эффектами можно пренебречь и считать электрическое поле между пластинами однородным. Направляя ось  $OY$  параллельно полю, мы имеем  $E_x = E_z = 0$ , а  $E_y = E$ .

В рассматриваемом случае на частицу действует только сила со стороны электрического поля, которая при выбранном направлении координатных осей целиком

направлена по оси ОУ. Следовательно, траектория движения частицы лежит в плоскости ХУ и уравнения движения принимают вид

$$\frac{dV_x}{dt} = 0, \quad \frac{dV_y}{dt} = \frac{q}{m} E. \quad (3)$$

Движение частицы, происходящее в этом случае под действием постоянной силы, подобно движению горизонтально брошенного тела в поле тяжести. Поэтому частица одновременно участвует в двух движениях - равномерном по горизонтали и равнопеременном по вертикали, а траекторией движения частицы будет парабола.

Интегрируя уравнения (3), получаем

$$V_x = \frac{dx}{dt} = const = V_0. \quad (4)$$

$$V_y = \frac{dy}{dt} = \frac{q}{m} Et + C, \quad (5)$$

где  $t = \frac{L}{V_0}$  - время нахождения частицы в электрическом поле, а  $C$  - постоянная

интегрирования. Так как при  $t = 0$  (момент, когда частица влетела в конденсатор)

$V_y = 0$ , то  $C = 0$ , и поэтому

$$V_y = \frac{dy}{dt} = \frac{q}{m} E \frac{L}{V_0}. \quad (6)$$

Для равноускоренного движения по вертикали при  $V_{0y} = 0$  и  $V_{0x} = V_0$ , получаем

$$Y = \frac{q}{m} \frac{E}{2} \left( \frac{L}{V_{0x}} \right)^2 \quad (7)$$

**Магнитное поле.** Сила, действующая на движущиеся в магнитном поле заряженные частицы, определяется формулой

$$\vec{F}_m = q[\vec{v}\vec{B}], \quad (8)$$

где  $q$  – это заряд частицы, движущейся со скоростью  $\vec{V}$  в магнитном поле, магнитная индукция которого равна  $\vec{B}$ .

Скалярное выражение для вычисления силы магнитного поля записывается в виде

$$F_m = qVB \sin \alpha, \quad (9)$$

где  $\alpha$ — угол между векторами скорости  $\vec{V}$  и магнитной индукцией  $\vec{B}$ .

*Сила, действующая на заряд, движущийся в однородном магнитном поле, равна произведению индукции этого поля на заряд, на скорость его движения и на синус угла между направлением магнитного поля и направлением движения заряда (т. е. между направлениями векторов  $\vec{V}$  и  $\vec{B}$ ).*

Из формулы определения магнитной силы (8) следует, что сила магнитного поля всегда перпендикулярна скорости движения заряженной частицы, поэтому эта сила не совершает работы. Таким образом, сила магнитного поля является центростремительной силой, сообщая движущемуся заряду нормальное ускорение, т.е. изменяет направление скорости движущейся заряженной частицы, но не изменяет модуля скорости.

Величина угла между векторами скорости  $\vec{V}$  и магнитной индукцией  $\vec{B}$  позволяет установить ряд закономерностей движения заряженных частиц в магнитном поле.

1. Заряженная частица движется в однородном магнитном поле со скоростью  $\vec{V}$  вдоль линий магнитной индукции: сила, которая вычисляется по формуле (9), равна нулю, т. е. магнитное поле на частицу не действует и она движется равномерно и прямолинейно.

2. Частица, имеющая электрический заряд  $q$  и массу  $m$ , влетает в однородное магнитное поле так, что ее скорость  $\vec{V}$  перпендикулярна вектору  $\vec{B}$ : сила магнитного поля

$$F_m = qVB \quad (10)$$

постоянна по модулю и нормальна к вектору скорости частицы. Согласно второму закону Ньютона, эта сила создает нормальное ускорение и частица будет двигаться по окружности, радиус которой определяется из условия

$$qVB = \frac{mV^2}{R}, \quad (11)$$

$$R = \frac{mV}{qB}. \quad (12)$$

Траектория движения заряда в магнитном поле в рассматриваемом случае представляет собой окружность в плоскости, перпендикулярной вектору магнитной индукции. Период вращения частицы  $T$ , т. е. время, за которое она совершает один полный оборот, вычисляется по формуле

$$T = \frac{2\pi R}{V}. \quad (13)$$

3. *Заряженная частица влетает в однородное магнитное поле со скоростью  $\vec{V}$  под углом  $\alpha$  к вектору  $\vec{B}$  магнитной индукции этого поля:* перпендикулярная составляющая скорости  $\vec{V}$  под действием силы магнитного поля изменяется только по направлению, а параллельная составляющая скорости остается постоянной; поэтому заряженная частица будет двигаться по винтовой линии (спирали), ось которой параллельна вектору  $\vec{B}$ .

**Электромагнитное поле.** Если имеются одновременно электрическое и магнитное поля, то на заряженную частицу, движущуюся со скоростью  $\vec{V}$  в электромагнитном поле, одновременно действуют сила электрического поля и сила магнитного поля; результирующая сила  $\vec{F}$ , действующая на частицу, определяется по формуле

$$\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{V}\vec{B}] \quad (14)$$

и носит название *силы Лоренца*.

Если пропустить пучок заряженных частиц через направленные под прямым углом друг к другу однородные электрическое и магнитное поля в направлении, которое перпендикулярно обоим полям, то можно подобрать соотношение между напряженностью  $\vec{E}$  электрического поля и индукцией  $\vec{B}$  магнитного поля так, чтобы пучок не отклонялся; в этом случае сила электрического поля и сила магнитного поля, действующие на каждую частицу, уравновешиваются и модули этих сил равны.

Основываясь на том, что заряженные частицы отклоняются в магнитном и электрическом полях, можно определить **удельный заряд частицы ( $q/m$ )** — **отношение заряда  $q$  частицы к ее массе  $m$** .

**Масс-спектрометр** представляет собой прибор, позволяющий определить удельный заряд иона, т. е. отношение его заряда к массе, а если заряд иона известен, то и его массу.

Масс-спектрометр имеет вакуумную камеру, в которой имеются три непрозрачные для ионов перегородки I, II и III с отверстиями  $O_1$ ,  $O_2$  и  $O_3$  (рис. 1), через которые пролетают ионы.

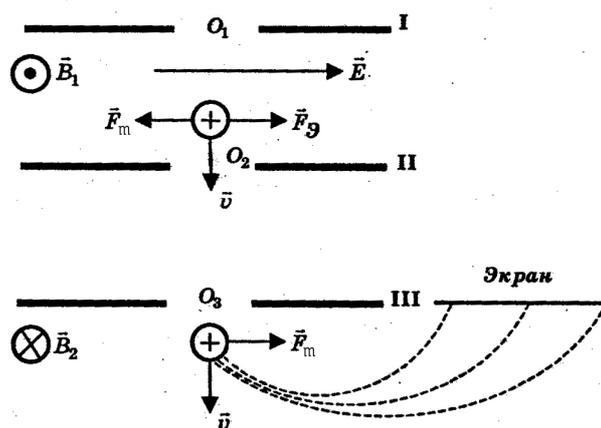


Рис.1.Схема масс-спектрометра.

Между перегородками I и II создают однородное электрическое поле напряженностью  $\vec{E}$  и однородное магнитное поле, вектор индукции  $\vec{B}_1$  которого направлен перпендикулярно вектору  $\vec{E}$  (на рис. 1 вектор  $\vec{B}_1$  направлен от чертежа к нам).

Если сквозь отверстие в перегородке I пролетает положительный ион со скоростью  $\vec{V}$ , перпендикулярной векторам  $\vec{E}$  и  $\vec{B}_1$ , то на него в электрическом и магнитном полях действуют противоположно направленные сила электрического поля  $\vec{F}_э$  и сила магнитного поля  $\vec{F}_M$ . При некоторой скорости иона эти силы окажутся уравновешенными, и тогда ион будет двигаться равномерно и прямолинейно и пролетит сквозь отверстия  $O_2$  и  $O_3$  в перегородках II и III с прежней скоростью  $\vec{V}$ . А если в пучке ионов есть такие, у которых иная скорость, то электрическая и магнитная силы не будут уравновешены. Тогда под действием результирующей этих сил, равной разности  $\vec{F}_э$  и  $\vec{F}_M$ , ион станет двигаться с ускорением влево или вправо и сквозь отверстия  $O_2$  и  $O_3$  не проникнет. Так, благодаря действию электрического и магнитного полей между первой и второй диафрагмами, сквозь отверстие  $O_3$  пролетают только ионы, имеющие одинаковую скорость, а ионы с иной скоростью отфильтровываются.

Пролетев сквозь отверстие  $O_3$ , положительный ион массой  $m$  с зарядом  $q$  попадает в однородное магнитное поле индукцией  $\vec{B}_2$ , направленное (на рис. 1 от нас за чертеж) перпендикулярно скорости иона  $\vec{V}$ . При этом на него начинает действовать сила магнитного поля

$$F_m = qVB_2, \quad (15)$$

под действием которой ион станет двигаться по дуге окружности радиусом  $R$

$$R = \frac{m V}{q B_2}. \quad (16)$$

Из формулы (16) получаем формулу вычисления удельного заряда частицы (q/m)

$$\frac{q}{m} = \frac{V}{B_2 R}. \quad (17)$$

Экран масс-спектрометра покрыт веществом, которое светится под ударами ионов. Зная расстояние от отверстия  $O_3$  до места вспышки на экране при ударе об него иона, можно разделить это расстояние пополам и тем самым определить радиус  $R$  полуокружности, по которой движется ион. При известных значениях скорости иона и индукции магнитного поля  $B_2$ , определив радиус его траектории  $R$ , по формуле (17) можно вычислить удельный заряд иона, а затем — и его массу.

С помощью масс-спектрометра ученые определили массы всех элементов таблицы Менделеева.

Откройте компьютерную модель "Движение заряда в электрическом поле", Внимательно рассмотрите модель, найдите все регуляторы и другие основные элементы и зарисуйте их в конспект. (Если вы забыли, как работать с системой компьютерного моделирования, прочитайте ВВЕДЕНИЕ ещё раз).

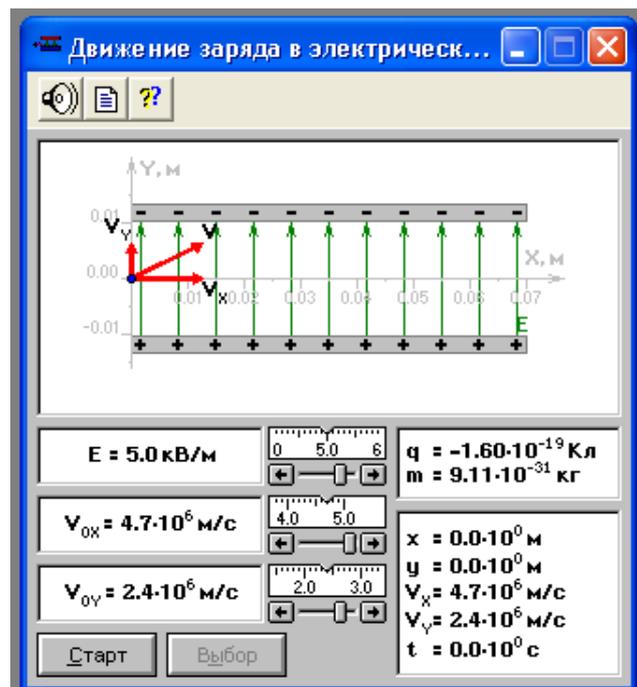


Рис. 2. Окно компьютерной модели "Движение заряда в электрическом поле".

В этой модели, при включенной кнопке "Выбор", задавая величину и знак напряженности электрического поля, величины вертикальной и горизонтальной составляющих скорости  $\vec{V}$ , с которой заряженная частица (заряд) влетает в поле плоского конденсатора, можно изменять траекторию и время движения частицы в конденсаторе. Движение частицы начинается при включении кнопки "Старт". В правом углу окна модели регистрируются значения координат и составляющих скорости частицы в момент времени  $t$ .

Нажав кнопку "Старт", наблюдайте на экране движение частицы при разных начальных параметрах.

Откройте компьютерную модель "Движение заряда в магнитном поле", Внимательно рассмотрите модель, найдите все регуляторы и другие основные элементы и зарисуйте их в конспект. (Если вы забыли, как работать с системой компьютерного моделирования, прочитайте ВВЕДЕНИЕ ещё раз).

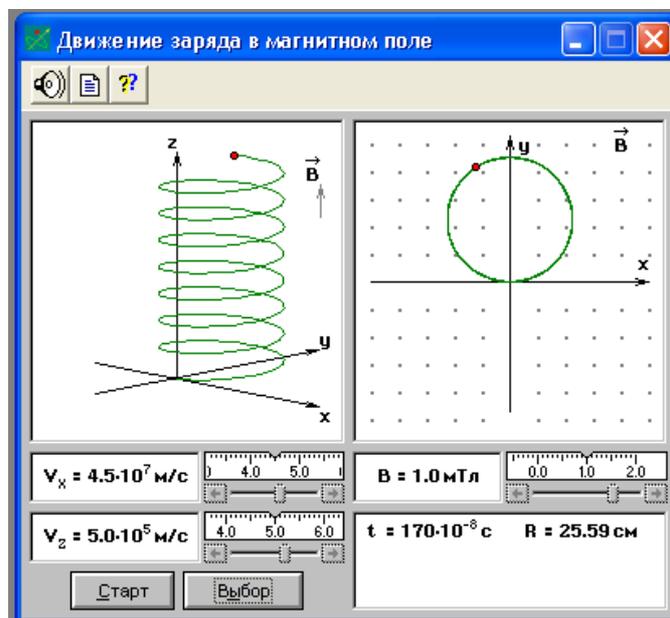


Рис. 3. Окно компьютерной модели "Движение заряда в магнитном поле".

В этой модели, при включенной кнопке "Выбор", задавая величину и знак индукции магнитного поля  $B$ , величины вертикальной и горизонтальной ( $\vec{V}_z$  и  $\vec{V}_x$ ) составляющих скорости  $\vec{V}$ , с которой заряженная частица (заряд) влетает в однородное

магнитное поле, можно изменять траекторию движения частицы. Движение частицы начинается при включении кнопки "Старт". В правом углу окна модели регистрируются значения времени  $t$  и радиус траектории движения частицы. Кнопкой "Стоп" можно останавливать движение в любой момент (при этом в окне модели фиксируется траектория движения частицы до этой остановки).

Нажав кнопку "Старт", наблюдайте на экране движение частицы при разных начальных параметрах.

Откройте компьютерную модель "Масс - спектрометр". Внимательно рассмотрите модель, найдите все регуляторы и другие основные элементы и зарисуйте их в конспект. (Если вы забыли, как работать с системой компьютерного моделирования, прочитайте ВВЕДЕНИЕ ещё раз).

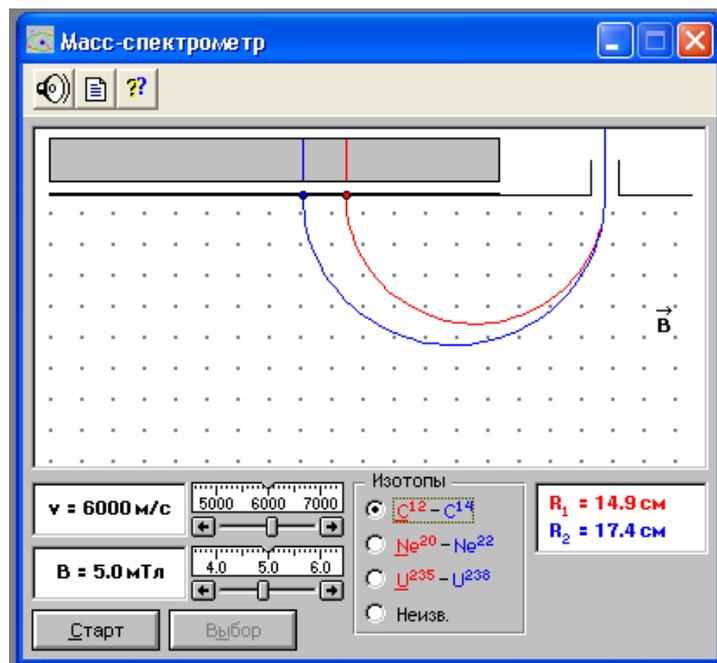


Рис. 4. Окно компьютерной модели "Масс - спектрометр".

В этой модели, при включенной кнопке "Выбор", можно для разных изотопов (выделив их нажатием соответствующей кнопки) задавать значения скорости, с которой изотопы влетают в однородное магнитное поле, величину индукции которого также задают при нажатой кнопке «Выбор». После нажатия кнопки «Старт» и завершения

движения изотопов, в правом углу высвечиваются значения радиусов траектории их движения в магнитном поле.

## Порядок выполнения работы

### Эксперимент 1. "Движение заряда в электрическом поле".

1. Запустите, дважды щелкнув мышью, виртуальный эксперимент "Движение заряда в электрическом поле". Выберите режим "Выбор".
2. Подведя маркер мыши к движку регулятора напряженности  $E$ , нажмите кнопку мыши и, удерживая ее в нажатом состоянии, установите числовое значение  $E$ , равное взятому из таблицы 1 для вашего варианта.
3. Подведите маркер мыши к движку регулятора скорости  $V_{0x}$  и установите значение скоростей  $V_{0x} = 2 \cdot 10^6$  м/с ; аналогично установите  $V_{0y} = 0$ .
4. Нажав кнопку «Старт», наблюдайте движение частицы. Если при заданном значении  $E$  и установленной величине скорости  $V_{0x}$  частица вылетела из конденсатора, то запишите числовые значения величин с правой нижней части окна экрана компьютерной модели в таблицу 2. **Если при заданных условиях частица из конденсатора не вылетела, увеличивая  $V_{0x}$ , подберите минимальное значение этой величины, при котором частица вылетает из конденсатора. Указанная при этом на экране величина горизонтального смещения частицы  $X, м$  равняется длине пластин конденсатора ( $L = 0,07 м$ ). Если вылета частицы из конденсатора не происходит даже при максимальном значении скорости  $V_{0x}$ , тогда при максимальном значении скорости  $V_{0x}$  уменьшайте значение напряженности  $E$  электрического поля до такого его значения, чтобы частица вылетела из конденсатора (не забудьте потом установить значение  $E$  из таблицы 1 для вашего варианта).**

5. Увеличьте значение начальной скорости  $V_{0x}$  на величину равную  $0.2 \cdot 10^6$  м/с. и проведите измерения параметров движения частицы в момент вылета из конденсатора. Запишите числовые значения с экрана в таблицу 2.

6. Повторите измерения по п.5 еще 5 раз, каждый раз увеличивая  $V_{0x}$  на величину равную  $0.2 \cdot 10^6$  м/с. Результаты записывайте в таблицу 2.

Таблица 1.

### Значения напряженности электрического поля для эксперимента 1

(не перерисовывать).

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
E, В/м	100	200	300	400	500	-100	-200	-300	-400	-500

Таблица 2.

### Результаты измерений при E = В/м

$V_{0x}, 10^6$ м/с										
Y, м										
$V_y, 10^6$ м/с										

### Эксперимент 2. "Движение заряда в магнитном поле".

1. Запустите, дважды щелкнув мышью, виртуальный эксперимент "Движение заряда в магнитном поле". Выберите режим "Выбор".

2. Зацепив мышью, поочередно перемещайте движки регуляторов индукции магнитного поля B, величины вертикальной и горизонтальной составляющих скорости частицы и зафиксируйте их значения  $V_{1z}$  и  $V_{1x}$ , указанные в таблице 3.

3. Нажав кнопку «Старт», наблюдайте движение заряженной частицы в магнитном поле.

4. Нажав кнопку "Стоп", зарисуйте траекторию движения частицы в плоскости YOX и в пространстве ZXY.
5. Запишите в таблицу 4 значение радиуса  $R_1$  траектории движения частицы.
6. Нажмите кнопку "Выбор".
7. Зацепив мышью, поочередно перемещайте движки регуляторов величины вертикальной и горизонтальной составляющих скорости и зафиксируйте их значения  $V_{2z}$  и  $V_{2x}$ , указанные в таблице 3.
8. Нажав кнопку «Старт», наблюдайте движение заряженной частицы в магнитном поле.
9. Нажав кнопку "Стоп", зарисуйте траекторию движения частицы в плоскости YOX и в пространстве ZXY.
10. Запишите в таблицу 4 значение радиуса  $R_2$  траектории движения частицы.

Таблица 3.

**Значения исходных характеристик для эксперимента 2 (не перерисовывать).**

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$B, 10^{-3}$ Тл	1,0	1,5	-1,0	0,5	2,0	-1,5	-0,5	0,8	-0,7	1,0
$V_{1x}, 10^7$ м/с	2,5	6,0	3,0	2,5	6,0	5,0	2,0	3,0	3,0	3,0
$V_{1z}, 10^5$ м/с	3,0	3,0	4,0	4,0	4,0	2,0	2,0	4,0	5,0	3,0
$V_{2x}, 10^7$ м/с	5,0	3,0	3,0	2,5	8,0	5,0	2,0	3,0	3,0	0,0
$V_{2z}, 10^5$ м/с	3,0	6,0	0,0	2,0	4,0	5,0	4,0	2,0	3,0	3,0

Таблица 4.

**Результаты измерений и расчетов при  $B = 10^{-3}$  Тл**

$R_1 =$	м	$R_2 =$	м
$R^*_1 =$	м	$R^*_2 =$	м

### Эксперимент 3. "Движение заряда в электромагнитном поле".

1. Запустите, дважды щелкнув мышью, виртуальный эксперимент "Масс - спектрометр".
2. Нажмите кнопку "Изотопы  $C^{12}$  -  $C^{14}$ ".
3. Выберите режим "Выбор". 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 5 для вашего варианта.
4. Аналогичным образом, зацепив мышью движок регулятора скорости, установите минимальное значение скорости  $10^3$  м/с.
5. Нажмите мышью кнопку «Старт». Проследите за движением двух изотопов в магнитном поле модельного масс-спектрометра
6. Запишите в таблицу 6 значения радиусов окружностей, по которым двигались эти изотопы (они показаны красным и синим цветом в правом углу окна).
7. Последовательно увеличивая скорость частиц на  $10^3$  м/с, проделайте п.п.4-6 ещё 6 раз и заполните таблицу 6.
8. Нажмите мышью кнопку «Изотопы  $Ne^{20}$ - $Ne^{22}$ », проведите при установленном уже для вашего варианта значении  $B$  измерения п.п.3-7 и заполните таблицу 7, составив её аналогично таблице 6.

**Внимание! Траектория движения изотопов может выходить за рамки окна компьютерной модели.**

*Таблица 5.*

#### Значения индукции магнитного поля для эксперимента 3

**(не перерисовывать).**

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$B$ , мТл	1	2	3	4	5	6	7	8	7	8

**Результаты измерений и расчетов для "Изотопов C<sup>12</sup> - C<sup>14</sup>".**

V, 10 <sup>3</sup> м/с							
R <sub>1</sub> , м							
R <sub>2</sub> , м							
T <sub>1</sub> , с							
T <sub>2</sub> , с							
q <sub>1</sub> /m <sub>1</sub> , Кл/кг							
q <sub>2</sub> /m <sub>2</sub> , Кл/кг							

**Обработка результатов измерений**

**Эксперимент 1**

- Постройте на отдельных листах графики экспериментальных зависимостей:
  - вертикального смещения на вылете заряда из конденсатора (Y) от квадрата обратной начальной скорости  $(1/V_{0X})^2$ ,
  - вертикальной составляющей скорости  $V_Y$  на вылете заряда из конденсатора от обратной начальной скорости  $(1/V_{0X})$ .
- Для каждого графика определите по его наклону экспериментальное значение удельного заряда частицы, используя формулы функции линейной зависимости

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

- Рассчитайте среднее значение экспериментально полученного удельного заряда частицы.
- Запишите ответ. Сформулируйте выводы по ответу и графикам.

**Эксперимент 2**

- Рассчитайте значение радиуса ( $R^*_1$  и  $R^*_2$ ) траектории движения заряженной частицы по формуле (12), подставив в неё значение скорости частицы  $V_{1X}$  и  $V_{2X}$

соответственно, установочное значение индукции магнитного поля  $B$ , массу  $m$  и численное значение заряда  $q$  для электрона.

2. Запишите результаты расчета в таблицу 4. Проанализируйте полученные значения и запишите вывод.

3. Проанализируйте траектории движения заряженной частицы в плоскости  $XOY$  и в пространстве  $XYZ$  для разных значений начальных скоростей  $V_{ix}$  и  $V_{iz}$ .

4. Запишите ответ на вопрос: как и почему влияют численные значения начальных скоростей на траекторию движения заряженной частицы в однородном магнитном поле?

### Эксперимент 3

1. Вычислите по формуле  $\left(\frac{q}{m} = \frac{V}{BR}\right)$  удельные заряды изотопов углерода и неона, запишите полученные значения в соответствующие графы таблиц 6 и 7.

2. Рассчитайте средние значения экспериментально полученных удельных зарядов исследованных изотопов. Проведите оценку погрешностей проведённых измерений.

3. Используя справочные материалы по физике и химии, определите табличные значения удельных зарядов исследованных изотопов и сравните их с полученными результатами опыта.

4. Вычислите по формуле  $\left(T = \frac{2\pi R}{V}\right)$  периоды движения изотопов углерода и запишите полученные значения в соответствующие графы таблиц 6 и 7.

5. Запишите ответ. Сформулируйте выводы по полученным результатам.

## Библиографический список

### *Основной*

*Савельев И. В.* Курс общей физики: В 5 кн. М: АСТ: Астрель, 2006. Кн. 2.

*Капуткин Д.Е., Шустиков А.Г.* Физика. Обработка результатов измерений при выполнении лабораторных работ. (№ 805). М.: МИСиС. «Учеба». 2007.

### *Дополнительный*

*Калашиников С.Г.* Электричество. Физматлит, 2006.

*Сивухин Д.В.* Общий курс физики. Физматлит, 2004. Т.2.

## Контрольные вопросы

1. Какая сила действует на заряженную частицу в электрическом поле? От чего зависит траектория движения этой частицы? Ответ поясните формулами и рисунками.
2. Зарисуйте траектории движения электрона, влетевшего между пластинами плоского конденсатора под углом к ним и параллельно им.
3. Какая сила действует на заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле? От чего зависит траектория движения этой частицы?
4. Поясните, почему сила, действующая на движущуюся заряженную частицу в магнитном поле, не совершает работу?
5. Что изменится в случаях, если: а) не изменяя заряд частицы и скорость, с которой она влетает в магнитное поле, изменить магнитную индукцию поля или по величине, или по направлению? б) не изменяя скорость и магнитную индукцию, изменить заряд частицы на противоположный? Ответы пояснить рисунками.
6. Задача. Магнитное поле, индукция которого  $B = 0,5$  мТл, направлено перпендикулярно к электрическому полю, напряженность которого равна  $E = 1$  кВ/м. Пучок электронов влетает в электромагнитное поле, причем скорость электронов

перпендикулярна к плоскости, в которой лежат векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$ . Найти скорость электрона, если при одновременном действии обоих полей пучок электронов не испытывает отклонения. Каким будет радиус траектории движения электронов при условии включения только одного магнитного поля? (Решение обосновать рисунком).

## Лабораторная работа № 2 – 09к

### ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ТОЧЕЧНЫХ ЗАРЯДОВ

Компьютерные модели «Электрическое поле точечных зарядов» и  
«Взаимодействие точечных зарядов»  
в сборнике компьютерных моделей «Открытая физика»  
раздел «Электричество и магнетизм»

#### Цель работы

- Знакомство с компьютерным моделированием электрического поля точечных зарядов.
- Экспериментальное подтверждение закономерностей для электрических полей точечного заряда.
- Экспериментальное определение величины электрической постоянной.

#### Методика виртуального эксперимента

В данной работе используются компьютерные модели, основанные на законе Кулона и на формулах вычисления силовой и электрической характеристик электрического поля точечного заряда.

*Физическую величину, определяющую способность тел к электромагнитным взаимодействиям, называют электрическим зарядом.* Для исследования и описания взаимодействия электрических зарядов вводится понятие точечного заряда, которое, как и понятие материальной точки, является физической абстракцией. **Точечный заряд** – заряд, распределенный на теле, линейные размеры которого пренебрежительно малы по сравнению с расстоянием до других заряженных тел, с которыми он взаимодействует.

Взаимодействие двух точечных электрических зарядов устанавливает **закон Кулона**: сила взаимодействия двух покоящихся точечных электрических зарядов прямо пропорциональна произведению модулей этих зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

$$F = k \frac{|q_1||q_2|}{\epsilon r^2}, \quad (1)$$

где  $F$  — сила взаимодействия точечных зарядов,  $q_1$  и  $q_2$  - модули зарядов,  $\epsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость среды, в которую помещены заряды (для воздуха  $\epsilon = 1$ ),  $r$  — расстояние между ними,  $k$  — коэффициент пропорциональности. Величина коэффициента пропорциональности  $k$  зависит от выбора системы единиц: в СГС  $k = 1$ , в СИ  $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$  - это значение получается при подстановке в формулу (2) численного значения **величины**  $\epsilon_0$ , которая называется **электрической**

**постоянной**, равного  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}. \quad (2)$$

Вектор силы  $\vec{F}$  в законе Кулона, часто называемый кулоновской силой, направлен вдоль прямой, соединяющей заряды. Сила Кулона является центральной силой отталкивания ( $F > 0$ ) при одинаковых знаках зарядов  $Q_1$  и  $Q_2$  (при одноименных зарядах) и силой притяжения ( $F < 0$ ) при разных знаках зарядов. Кулоновские силы подчиняются третьему закону Ньютона, поскольку они равны по модулю; направлены противоположно друг другу вдоль прямой, соединяющей точечные заряды; действуют парами; являются силами одной природы; приложены к разным телам.

Переносчиком взаимодействия электрических зарядов является **электрическое поле**. **Электрическое поле** — это форма материи, окружающая электрически заряженные тела. Электрическое поле, окружающее неподвижные заряды-источники поля, называется **электростатическим** (т. е. полем неподвижных зарядов).

Силовой характеристикой электростатического поля в данной точке является векторная величина, называемая *напряженностью электростатического поля*.

*Напряженность электростатического поля — физическая величина, определяемая силой, действующей на единичный положительный точечный (пробный) заряд, помещенный в данную точку поля:*

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q_0}. \quad (3)$$

Вектор напряженности  $\vec{E}$  сонаправлен с вектором силы, действующей на положительный пробный заряд, внесенный в данную точку электрического поля. Направление и величина вектора напряженности электрического поля в данной точке определяются исключительно знаком заряда-источника. Вектор напряженности электрического поля в данной точке имеет свое направление и величину, даже если в этой точке никакого пробного заряда нет: *если поле создается положительным зарядом, то вектор  $\vec{E}$  направлен вдоль радиуса-вектора от заряда во внешнее пространство (отталкивание пробного положительного заряда), если поле создается отрицательным зарядом, то вектор  $\vec{E}$  направлен к заряду.*

-Напряженность поля точечного заряда в вакууме вычисляется по формуле

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}, \quad (4)$$

согласно которой *напряженность электрического поля точечного заряда-источника  $Q$  в некоторой точке поля прямо пропорциональна величине этого заряда и обратно пропорциональна квадрату расстояния  $r$  между этой точкой поля и зарядом-источником.*

Сила, действующая на любой заряд  $q$ , размещенный в данную точку поля, со стороны электрического поля, вычисляется по формуле

$$\vec{F} = q\vec{E}, \quad (5)$$

где  $\vec{E}$  - вектор напряженности в той точке электрического поля, в которую помещен заряд  $q$ . Так как заряд  $q$  – это скалярная постоянная величина, то направление вектора силы  $\vec{F}$  определяется направлением вектора напряженности электрического поля  $\vec{E}$  и зависит от знака заряда.

Энергетической характеристикой электростатического поля в данной точке является скалярная величина, называемая *потенциалом электростатического поля*.

*Потенциал электростатического поля* — физическая величина, численно равная потенциальной энергии, которой обладал бы в данной точке поля единичный положительный (пробный) заряд

$$\varphi = \frac{W_n}{q_{пр}}. \quad (6)$$

Потенциал поля точечного заряда в вакууме вычисляется по формуле

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}, \quad (7)$$

согласно которой *потенциал электрического поля точечного заряда-источника  $Q$  в некоторой точке поля прямо пропорционален величине этого заряда и обратно пропорционален расстоянию  $r$  между этой точкой поля и зарядом-источником*.

Откройте компьютерную модель «Электрическое поле точечных зарядов». Внимательно рассмотрите модель, найдите все регуляторы и другие основные элементы и зарисуйте их в конспект. (Если вы забыли, как работать с системой компьютерного моделирования, прочитайте ВВЕДЕНИЕ ещё раз). Модель имеет две конфигурации - "Один заряд" и "Два заряда" и две метки - "Силовые линии" и "Эквипотенциали". В этой модели при конфигурации "Два заряда" можно изменять с помощью движков величину зарядов и расстояние между зарядами. Численные значения напряженности  $E$  и потенциала  $\varphi$  появляются в окне модели при исследовании электрического поля. Для этого необходимо установить курсор (здесь он имеет вид руки) в точку поля, нажать левую кнопку мыши и **при нажатой кнопке мыши на экране фиксируются численные**

значения напряженности  $E$  и потенциала  $\varphi$  в исследуемой точке электрического поля.

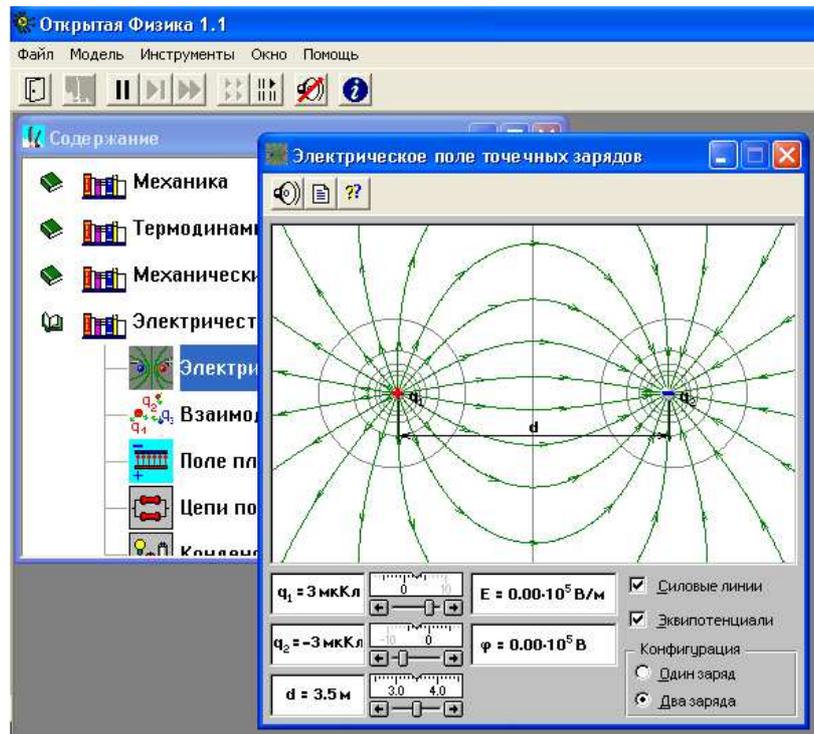


Рис. 1. Окно компьютерной модели «Электрическое поле точечных зарядов» при конфигурации "Два заряда".

Откройте компьютерную модель «Взаимодействие электрических зарядов». Внимательно рассмотрите модель, найдите все регуляторы и другие основные элементы и зарисуйте их в конспект. В этой модели можно не только изменять с помощью движков величину зарядов (величина которых выводится в левом нижнем углу окна модели), но и менять расстояние между зарядами с помощью мышки, "зацепив" заряд и перемещая его на необходимое расстояние (оно фиксируется как расстояние между зарядами  $r_{ij}$ ). При изменении величины зарядов и расстояния между ними изменяется значение кулоновской силы взаимодействия между зарядами  $F_{ij}$ , направление которой изображено в виде стрелочек. (Если вы забыли, как работать с системой компьютерного моделирования, прочитайте ВВЕДЕНИЕ ещё раз).

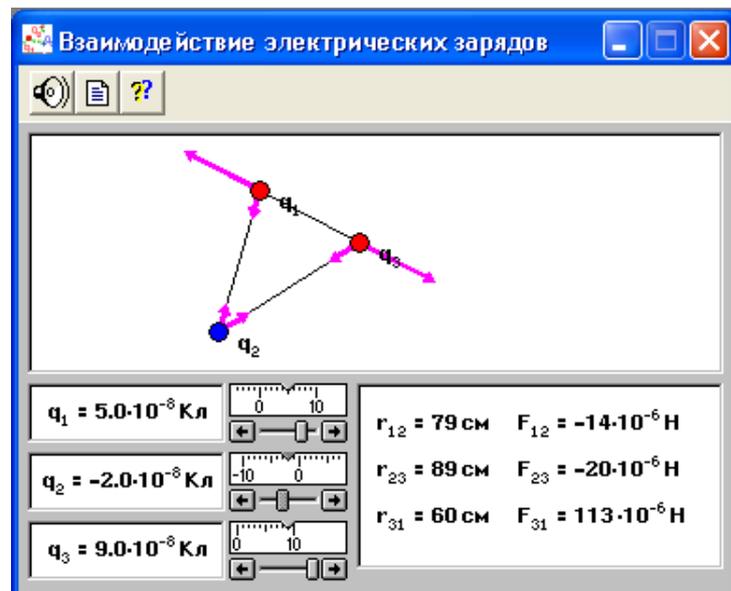


Рис. 2. Окно компьютерной модели «Взаимодействие электрических зарядов».

При использовании этой компьютерной модели в виртуальном эксперименте 3, устанавливают значение заряда  $q_3 = 0 \text{ Кл}$ , а для заряда  $q_2$  минимальное. Таким образом, эту модель можно использовать для исследования величины силовой характеристики (напряженности  $E$ ) электрического поля точечного заряда-источника  $q_1$ . Величину напряженности электрического поля в исследуемой точке можно рассчитать по формуле

$$E = \frac{F_{12}}{q_2}, \quad (8)$$

где  $F_{12}$  - величина силы взаимодействия между зарядами  $q_1$  и  $q_2$ .

## Порядок выполнения работы

### Эксперимент 1

1. Запустите, дважды щелкнув левой кнопкой мыши, виртуальный эксперимент «Электрическое поле точечных зарядов». Установите конфигурацию "Два заряда".
2. Значение заряда  $q_3$  установите равной 0 (в этом эксперименте заряд  $q_3$  не используют).

3. Перемещая движок регулятора значений заряда  $q_1$  (в этом эксперименте заряд  $q_1$  используют в качестве точечного заряда-источника  $Q$  электрического поля), установите значение заряда  $q_1$ , указанное в табл.1 для вашего варианта.

Таблица 1.

**Значения величины точечного заряда-источника электрического поля (не перерисовывать).**

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Значение $q_1$ , мкКл	-5	-4	-3	-2	2	3	4	5	-4	-5

4. Установите значение  $d$  (в этом эксперименте  $d$  используют как расстояние  $r$  между зарядом-источником  $Q$  электрического поля и исследуемой точкой поля), указанное в табл. 2.

Таблица 2.

#### Результаты измерений напряженности и потенциала

$d$ , м	2	2,5	3	3,5	4
$E$ , В/м					
$\varphi$ , В					

5. Подведя указатель мыши к месту расположения заряда  $q_2$  (предварительно установив его минимальное значение), расположите его примерно на 1 мм ниже заряда  $q_1$  вдоль нарисованной вертикальной линии, нажмите левую кнопку мыши и запишите численные значения напряженности  $E$  и потенциала  $\varphi$  в табл. 2.

6. Повторите измерения напряженности  $E$  и потенциала  $\varphi$  электрического поля (пункты 4 и 5) для других значений расстояния  $d$  из табл. 2.

#### Эксперимент 2

1. Запустите, дважды щелкнув левой кнопкой мыши, виртуальный эксперимент «Электрическое поле точечных зарядов». Установите конфигурацию "Два заряда".

2. Значение заряда  $q_3$  установите равной 0 (в этом эксперименте заряд  $q_3$  не используют).

3. Установите значение  $d$  (в этом эксперименте  $d$  используют как расстояние  $r$  между зарядом-источником  $Q$  электрического поля и исследуемой точкой поля), указанное в таблице 3 для вашего варианта.

Таблица 3.

**Значения расстояния от точечного заряда до исследуемой точки (не перерисовывать).**

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Значение $d$ , м	2	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8

4. Перемещая движок регулятора значений заряда  $q_1$  (в этом эксперименте заряд  $q_1$  используют в качестве точечного заряда-источника  $Q$  электрического поля), установите значение заряда  $q_1$  из таблицы 4.

Таблица 4.

**Результаты измерений напряженности и потенциала**

$q_1$ , мкКл	1	2	3	4	5
$E$ , В/м					
$\varphi$ , В					

5. Подведя указатель мыши (руку) к месту расположения заряда  $q_2$ , установите его примерно на 1 мм ниже заряда  $q_1$ , нажмите левую кнопку мыши и запишите численные значения напряженности  $E$  и потенциала  $\varphi$  в табл. 4.

6. Повторите измерения напряженности  $E$  и потенциала  $\varphi$  электрического поля (пункты 4 и 5) для других значений заряда  $q_1$  из табл. 4.

### Эксперимент 3

1. Запустите, дважды щелкнув левой кнопкой мыши, виртуальный эксперимент «Взаимодействие электрических зарядов».
2. "Зацепив" мышью, перемещайте заряд  $q_3$  и зафиксируйте его в верхнем левом углу рабочего поля модели, а его значение установите равной 0 (в этом эксперименте заряд  $q_3$  не используют).
3. "Зацепив" мышью, перемещайте заряд  $q_1$  и зафиксируйте его ниже заряда  $q_3$  вблизи левой границы рабочего поля модели (в данном эксперименте этот заряд является источником поля).
4. Перемещайте движок регулятора величины первого заряда и установите величину заряда  $q_{1(1)}$ , указанную в табл. 5 для вашего варианта.

Таблица 5.

**Значения величины точечного заряда  $q_{1i}$  (не перерисовывать).**

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Значение $q_{1(1)}, \cdot 10^{-8}$ Кл	1	-2	3	-4	5	-6	7	-8	9	-10
Значение $q_{1(2)}, \cdot 10^{-8}$ Кл	-7	5	-8	9	-1	3	-10	2	-6	4

Заряд  $q_2$  установите равным  $1 \cdot 10^{-8}$  Кл (в этом эксперименте заряд  $q_2$  играет роль пробного заряда).

5. Перемещайте, нажав левую кнопку мыши, заряд  $q_2$  ниже заряда  $q_1$ , устанавливая расстояние  $r_{12}$  (значение этого расстояния регистрируется в правой нижней части окна модели), указанное в табл. 6 первым и запишите в табл.6 значение измеренной силы  $F_{12}$ .

Таблица 6.

**Результаты измерений и расчетов для заряда  $q_{1(1)} =$**

$r_{12}, \text{ м}$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
$1/r_{12}^2, \text{ м}^{-2}$					
$F_{12}, \cdot 10^{-6} \text{ Н}$					
$E, \text{ В/м}$					

6. Повторите измерения п.6 для других значений расстояния  $r_{12}$ , заполняя третью строку табл.6.
7. Установите величину заряда  $q_{1(2)}$ , указанную в табл. 5 для вашего варианта.
8. Повторите измерения п.6 и п.7 для  $q_{1(2)}$ , заполняя третью строку табл.7.

Таблица 7.

**Результаты измерений и расчетов для заряда  $q_{1(2)} =$**

$r_{12}, \text{ м}$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
$1/r_{12}^2, \text{ м}^{-2}$					
$F_{12}, \cdot 10^{-6} \text{ Н}$					
$E, \text{ В/м}$					

**Обработка результатов измерений**

**Эксперимент 1**

1. Постройте графики зависимости напряженности ( $E$ ) электрического поля точечного заряда от квадрата обратного расстояния ( $1/d^2$ ) и зависимости потенциала ( $\varphi$ ) электрического поля точечного заряда от обратного расстояния ( $1/d$ ) между зарядом-источником электрического поля и исследуемой точкой поля.

2. Определите (для каждого графика) численное значение электрической

постоянной  $\varepsilon_0$ , используя формулы  $\varepsilon_0 = \frac{q_1}{4\pi} \frac{\Delta\left(\frac{1}{d^2}\right)}{\Delta(E)}$  (где  $q_1$  - величина точечного заряда-

источника электрического поля,  $\frac{\Delta\left(\frac{1}{d^2}\right)}{\Delta(E)}$  - отношение приращения квадрата обратного

расстояния к приращению напряженности электрического поля) и  $\varepsilon_0 = \frac{q_1}{4\pi} \frac{\Delta\left(\frac{1}{d}\right)}{\Delta(\varphi)}$  (где  $q_1$  -

величина точечного заряда-источника электрического поля,  $\frac{\Delta\left(\frac{1}{d}\right)}{\Delta(\varphi)}$  - отношение приращения обратного расстояния к приращению потенциала электрического поля).

3. Запишите выводы по результатам расчетов и анализа графиков.

### Эксперимент 2

1. Постройте графики зависимости напряженности (E) электрического поля точечного заряда от величины заряда  $q_1$  и зависимости потенциала ( $\varphi$ ) от величины заряда  $q_1$ .

2. Определите (*для каждого графика*) численное значение электрической постоянной  $\varepsilon_0$ , используя формулы  $\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi d} \frac{\Delta(q_1)}{\Delta(E)}$  (где d - расстояние до исследуемой

точки поля,  $\frac{\Delta(q_1)}{\Delta(E)}$  - отношение приращения величины заряда  $q_1$ -источника электрического поля к приращению напряженности электрического поля) и

$\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi d} \frac{\Delta(q_1)}{\Delta(\varphi)}$  (где d - расстояние до исследуемой точки поля,  $\frac{\Delta(q_1)}{\Delta(\varphi)}$  - отношение приращения величины заряда  $q_1$ -источника электрического поля к приращению потенциала электрического поля).

3. Запишите выводы по результатам расчетов и анализа графиков.

### Эксперимент 3.

1. Вычислите и запишите в таблицы 6 и 7 значения для второй строки.
2. Используя формулу (8), вычислите величину напряженности электрического поля  $E_1$  в исследуемой точке, подставив в неё значение измеренной силы  $F_{12}$  и заряда  $q_{1i}$ , и занесите в соответствующую строку таблиц 6 и 7.

3. Постройте на одном листе графики зависимости напряженности электрического поля ( $E_i$ ) точечного заряда  $q_{i1}$  от квадрата обратного расстояния ( $1/r^2$ ), используя соответствующие значения из таблиц 6 и 7.

4. Определите (*для каждого графика*) электрическую постоянную, используя

формулу  $\epsilon_0 = \frac{q_1}{4\pi} \frac{\Delta(\frac{1}{r^2})}{\Delta(E)}$ , где  $\frac{\Delta(\frac{1}{r^2})}{\Delta(E)}$  - отношение приращения обратного квадрата

расстояния к соответствующему приращению напряженности электрического поля.

5. Вычислите среднее значение электрической постоянной.

6. Запишите ответ и проанализируйте ответ и графики.

## Библиографический список

### *Основной*

*Савельев И. В.* Курс общей физики: В 5 кн. М: АСТ: Астрель, 2006. Кн. 2.

*Капуткин Д.Е., Шустиков А.Г.* Физика. Обработка результатов измерений при выполнении лабораторных работ. (№ 805). М.: МИСиС. «Учеба». 2007.

### *Дополнительный*

*Калашиников С.Г.* Электричество. Физматлит, 2006.

*Сивухин Д.В.* Общий курс физики. Физматлит, 2004. Т.2.

## Контрольные вопросы

1. Что такое электрическое поле? Назовите источники электрического поля. Дайте определение силовой и энергетической характеристик электрического поля.

2. Запишите формулы вычисления напряженности и потенциала электрического поля точечного заряда; поясните физический смысл величин, входящих в эти формулы.

3. Какая сила действует на заряженное тело в электрическом поле?
4. Запишите закон Кулона и поясните физический смысл величин в него входящих.
5. Сформулируйте принцип суперпозиции для электрических полей.
6. Задача. Два точечных заряда  $q_1 = 7,5$  нКл и  $q_2 = - 14,7$  нКл расположены на расстоянии равном  $r = 5$  см. Найти напряженность электрического поля в точке, находящейся на расстоянии  $a = 3$  см от положительного заряда и  $b = 4$  см от отрицательного заряда.

## Лабораторная работа № 2 – 10к

### ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Компьютерная модель «Цепи постоянного тока»  
в сборнике компьютерных моделей «Открытая физика»  
раздел «Электричество и магнетизм»

#### Цель работы

- Знакомство с компьютерным моделированием цепей постоянного тока.
- Экспериментальное подтверждение закона Ома.

#### Методика виртуального эксперимента

В данной работе используется компьютерная модель, основанная на законе Ома для постоянного тока

$$I = \frac{U}{R}, \quad (1)$$

где  $I$  – сила тока в электрической цепи;  $U$  – напряжение;  $R$  – сопротивление.

*Для замкнутой цепи закон Ома имеет следующий вид: сила тока в замкнутой цепи прямо пропорциональна ЭДС, действующей в цепи, и обратно пропорциональна сумме электрических сопротивлений внешнего и внутреннего участков цепи:*

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}, \quad (2)$$

где  $\mathcal{E}$  – ЭДС (электродвижущая сила),  $R$  — внешнее сопротивление,  $r$  — внутреннее сопротивление источника тока (*в компьютерной модели внутренним сопротивлением пренебрегают в виду его малости*).

Проводник, сопротивление которого зависит от длины, площади поперечного сечения и удельного электросопротивления, называют резистором. Для измерения силы тока амперметр (А) подключают к проводнику последовательно, для измерения напряжения вольтметр (V) подключают к проводнику параллельно.

### **Последовательное соединение проводников.**

*В случае последовательного соединения проводников конец первого проводника соединяют с началом второго и т.д. При последовательном соединении n проводников:*

- сила тока  $I$  одинакова во всех резисторах;

$$I = I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_n, \quad (3)$$

- напряжение  $U$  на концах всей цепи равно сумме напряжений на всех последовательно включенных проводниках

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n; \quad (4)$$

- общее сопротивление последовательно соединенных резисторов  $R$  равно их сумме

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n. \quad (5)$$

### **Параллельное соединение проводников**

*В случае параллельного соединения проводников их начала и концы имеют общие точки подключения к источнику тока. При параллельном соединении n проводников:*

- напряжение  $U$  одинаково на всех резисторах

$$U_1 = U_2 = U_3 = \dots = U_n; \quad (6)$$

- сила тока  $I$  в неразветвленной цепи равна сумме всех токов на всех параллельно включенных проводниках

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n, \quad (7)$$

- общее сопротивление  $R$  при параллельном соединении проводников вычисляются по формуле:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}. \quad (8)$$

Откройте компьютерную модель «Цепи постоянного тока». Внимательно рассмотрите модель, найдите все регуляторы и другие основные элементы. Рассмотрите, какой значок на панели установки значений соответствует элементу электрической цепи (соединительные провода, источник тока, резистор, вольтметр и амперметр) и зарисуйте их в конспект. (Если вы забыли, как работать с системой компьютерного моделирования, прочитайте ВВЕДЕНИЕ ещё раз).

При открытии компьютерной модели рабочее поле помечено точками, между которыми возможно размещать элементы электрической цепи (рис.1).

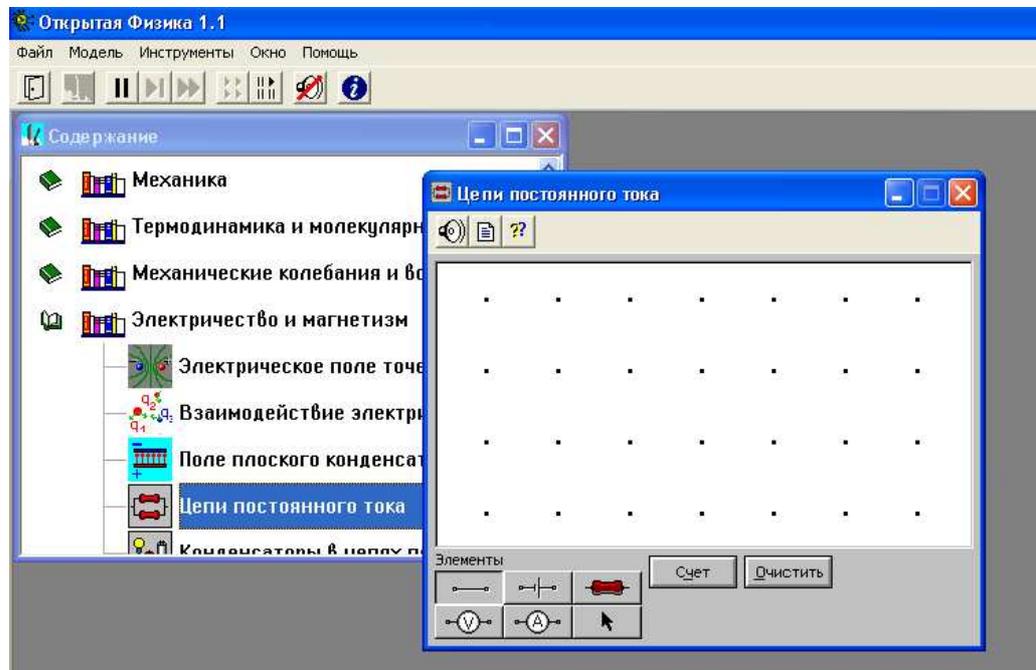


Рис. 1. Окно компьютерной модели «Цепи постоянного тока».

Соберите на чистом экране компьютерной модели простейшую электрическую цепь. Для примера соберите цепь, изображенную на рис. 2.

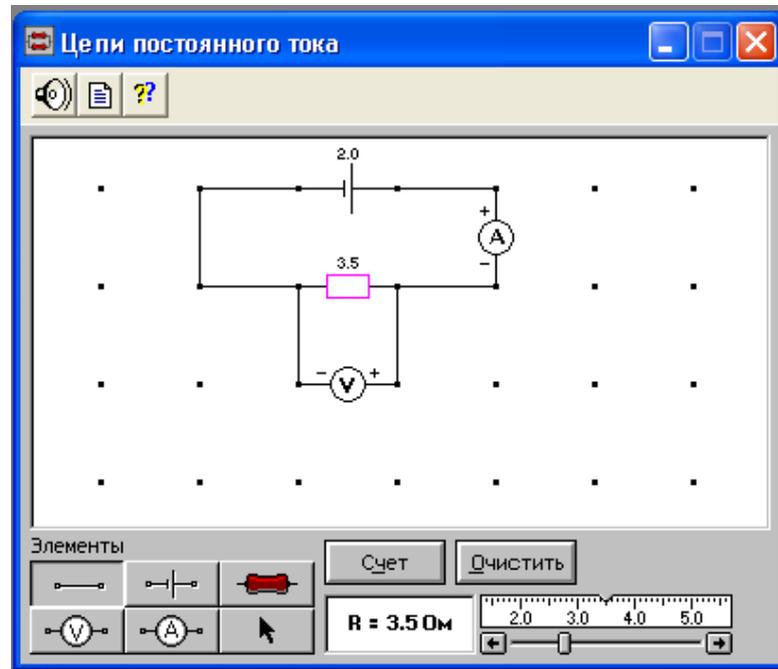


Рис. 2. Компьютерная модель «Цепи постоянного тока» в режиме сборки цепи и установки значений э.д.с.  $\mathcal{E}$  и сопротивлений  $R$ .

Для установления источника тока сначала щелкните левой кнопкой мыши в нижней левой части экрана на кнопку э.д.с.. Переместите маркер мыши на рабочую часть экрана, где расположены точки. Щелкните левой кнопкой мыши в рабочей части экрана, где будете размещать источник тока (э.д.с.). После этого появится изображение источника тока и цифры 1.0 над ним. **Всегда при размещении источника тока модель автоматически устанавливает значение его э.д.с. равное 1.0 В.** В нижней правой части экрана компьютерной модели размещена масштабная линейка, с помощью которой можно задавать необходимое значение э.д.с. источника тока. Для установления необходимого значения  $\mathcal{E}$  (э.д.с.) щелкните левой кнопкой мыши на кнопке со стрелкой. Подведите маркер мыши к движку регулятора значений э.д.с.. Нажмите левую кнопку

мышь и, удерживая ее в нажатом состоянии, меняйте величину параметра до установления необходимого числового значения (например, 2.0 В).

Для установления резистора (проводника) щелкните левой кнопкой мыши в нижней левой части экрана на кнопку резистора. Переместите маркер мыши на рабочую часть экрана, где расположены точки. Щелкните левой кнопкой мыши в рабочей части экрана, где будете размещать резистор. После этого появится изображение резистора и цифры 1.0 над ним. ***Всегда при размещении резистора модель автоматически устанавливает значение его сопротивления равное 1.0 Ом.*** В нижней правой части экрана компьютерной модели размещена масштабная линейка, с помощью которой можно задавать необходимое значение сопротивления. Для установления необходимого значения R щелкните левой кнопкой мыши на кнопке со стрелкой. Подведите маркер мыши к движку регулятора значений R. Нажмите левую кнопку мыши и, удерживая ее в нажатом состоянии, меняйте величину параметра до установления необходимого числового значения (например, 3.5 Ом).

Для установления амперметра (или вольтметра) щелкните левой кнопкой мыши в нижней левой части экрана на соответствующую кнопку. Переместите маркер мыши на рабочую часть экрана, где расположены точки. Щелкните левой кнопкой мыши в рабочей части экрана, где будете размещать амперметр или вольтметр. После этого появится изображение соответствующего элемента. В обозначении измерительных приборов (амперметра и вольтметра) на схеме в компьютерной модели символы «+» и «-» обозначают полярность подключения.

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.

Готовая электрическая схема показана на рис.2. в режиме сборки цепи и установки значений необходимых параметров.

В компьютерной модели есть две кнопки: «Счет» и «Очистить». Нажатие кнопки «Очистить» дает чистое рабочее поле компьютерной модели. **Нажатие кнопки «Счет» позволяет снять показания измерительных элементов электрической цепи – амперметра и вольтметра.** Например, собранная ранее схема (рис.2) после нажатия кнопки «Счет» показывает значения тока 0.57А и напряжения 2.00 В (рис. 3).

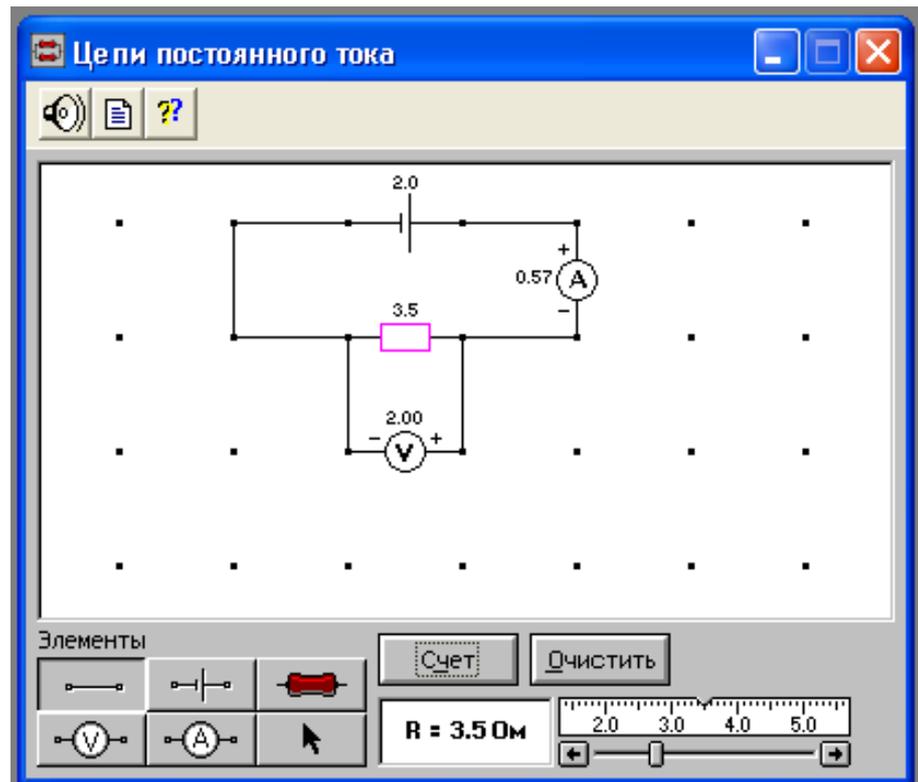


Рис. 3. Компьютерная модель «Цепи постоянного тока» в режиме «Счет».

Компьютерная модель «Цепи постоянного тока» позволяет: а) вносить изменения в электрическую схему и б) изменять значения э.д.с.  $\mathcal{E}$  и сопротивлений  $R$  уже созданной схемы.

Для внесения изменений необходимо подвести маркер мыши к тому месту электрической цепи, в котором необходимо заменить элемент цепи и один раз щелкнуть левой кнопки мыши – это приводит к уничтожению элемента; далее устанавливают элементы цепи и их численные значения, как описано выше.

*Изменять значения э.д.с.  $\mathcal{E}$  и сопротивлений  $R$  уже созданной схемы можно при активном режиме элемента, когда элемент на схеме в компьютерной модели окрашен в красный цвет и внизу справа открыта шкала возможных значений этого элемента. Для установления необходимого значения подведите маркер мыши к движку регулятора значений элемента, нажмите левую кнопку мыши и, удерживая ее в нажатом состоянии, меняйте величину параметра до установления необходимого числового значения, величина которого указывается на экране модели возле элемента.*

*Ввести элемент в активный режим возможно следующими действиями: нажать маркер мыши на кнопку обозначения элемента, нажать маркер мыши на кнопку обозначения стрелочки, нажать маркер мыши на элемент в схеме компьютерной модели.*

## **Порядок выполнения работы**

### **Эксперимент 1**

1.1. Перерисуйте в конспект схему, номер которой соответствует номеру вашего варианта (рисунки 4 – 13), *с указанием численных значений всех элементов.*

1.2. Используя формулы вычисления сопротивления электрической цепи при последовательном и параллельном соединении проводников и закон Ома, вычислите численное значение сопротивления  $R_x$ , которое соответствует численным значениям элементов электрической схемы.

*(Вышеперечисленные пункты необходимо выполнить при подготовке к лабораторной работе).*

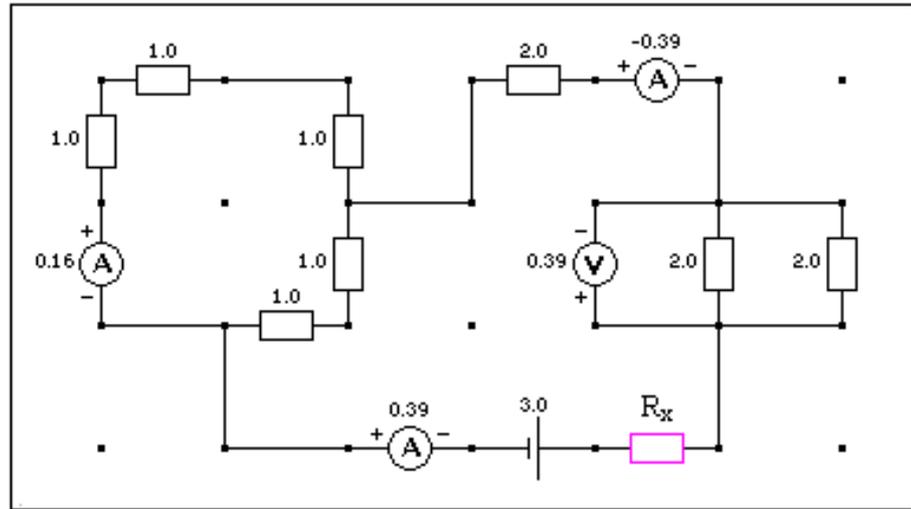


Рис.4. Схема № 1 (вариант 1).

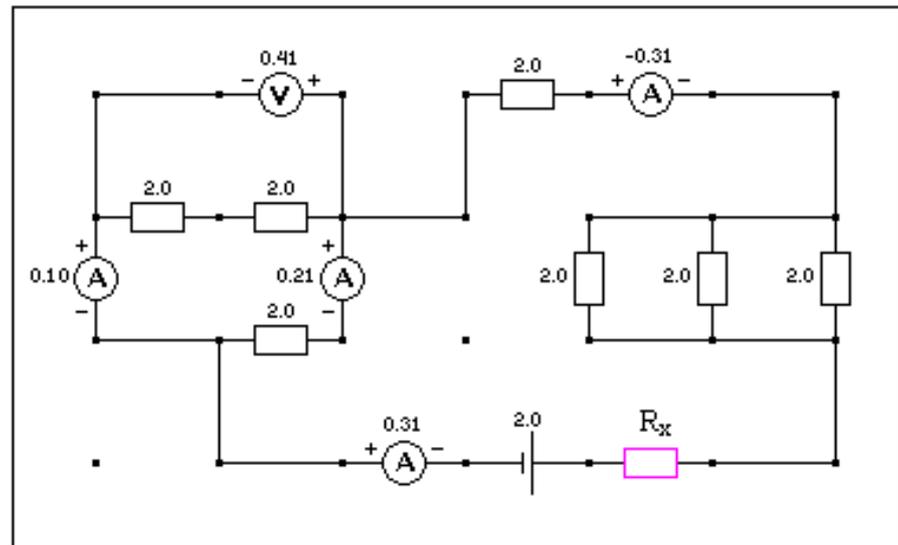


Рис.5. Схема № 2 (вариант 2).

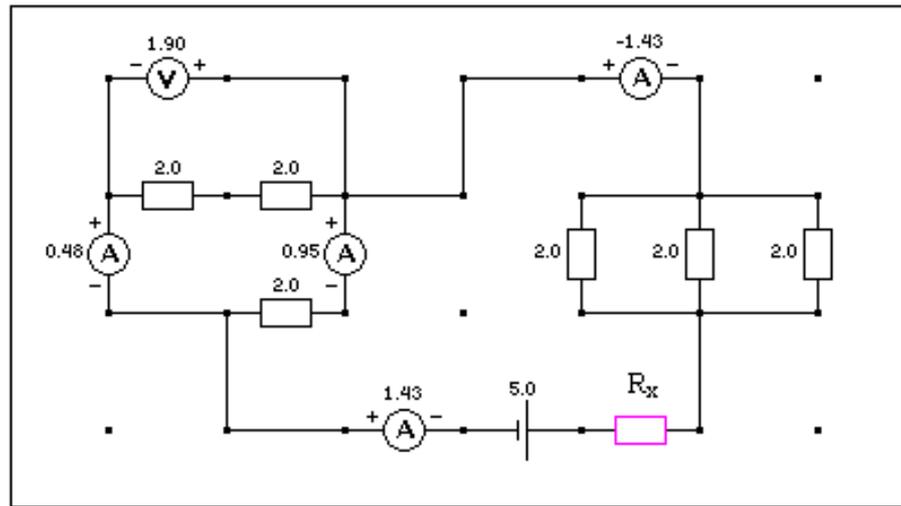


Рис.6. Схема № 3 (вариант 3).

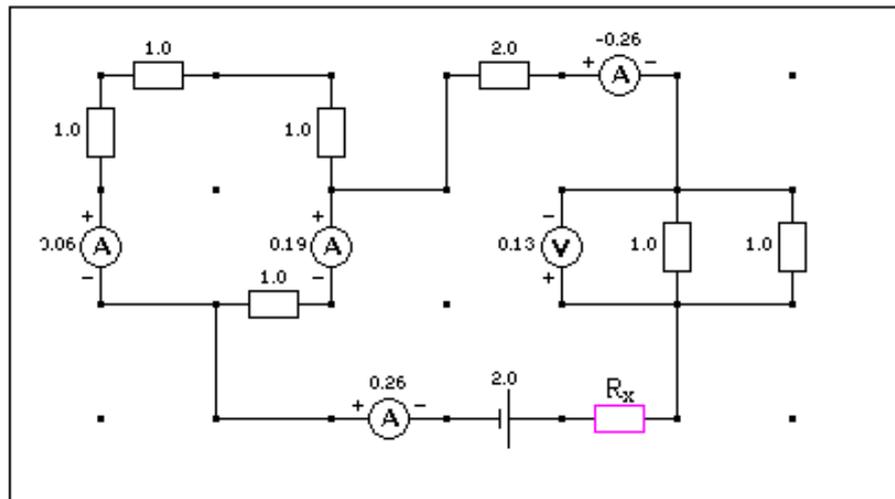


Рис.7. Схема № 4 (вариант 4).

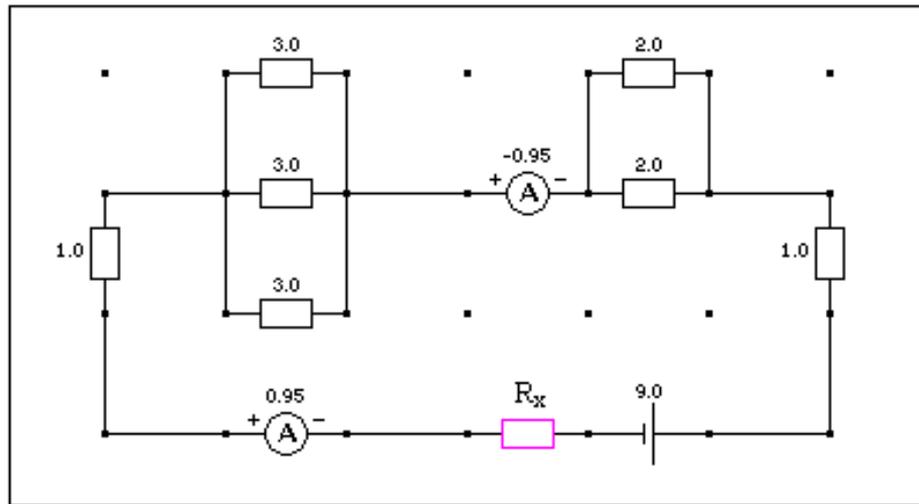


Рис.8. Схема № 5 (вариант 5).

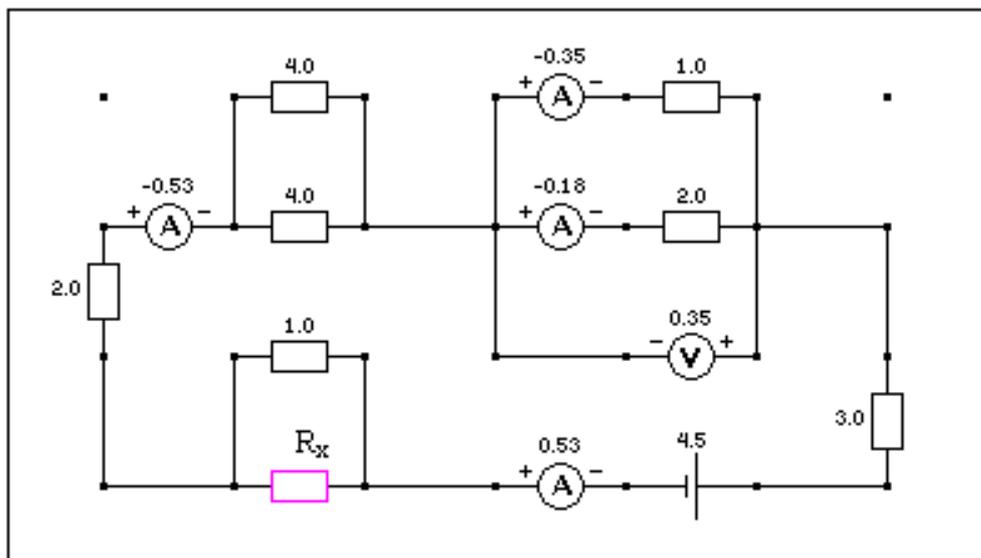


Рис.9. Схема № 6 (вариант 6).

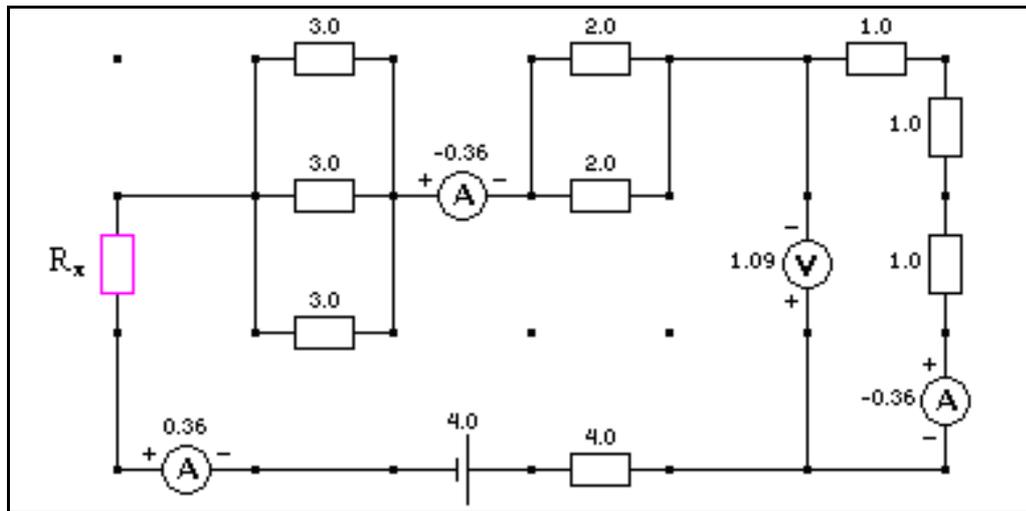


Рис.10. Схема № 7 (вариант 7).

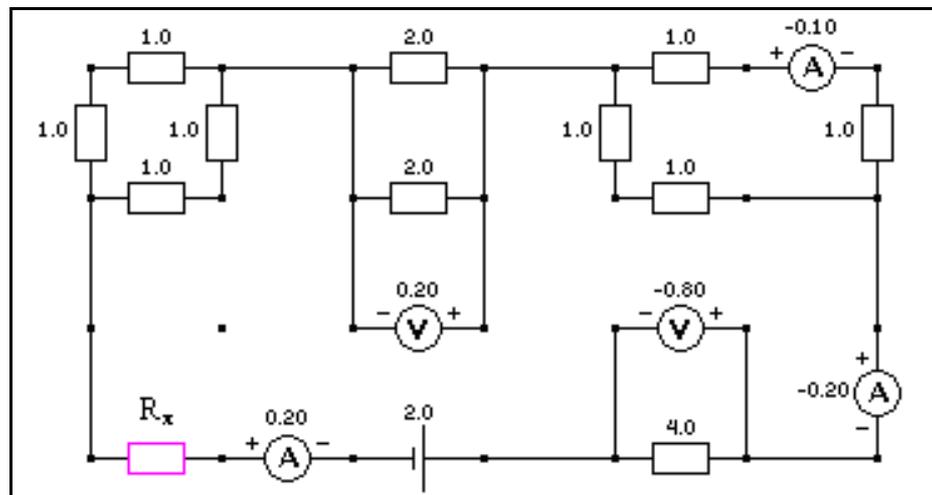


Рис.11. Схема № 8 (вариант 8).

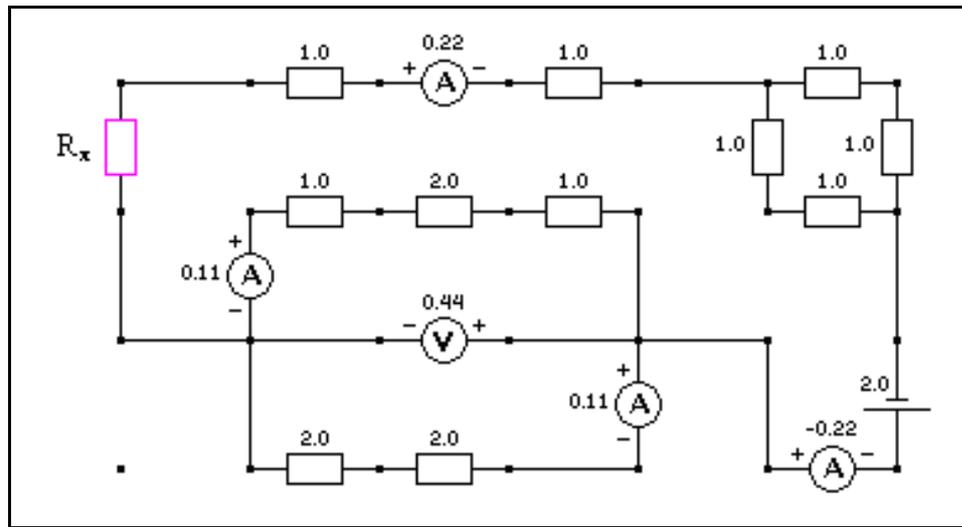


Рис.12. Схема №9 (вариант 9).

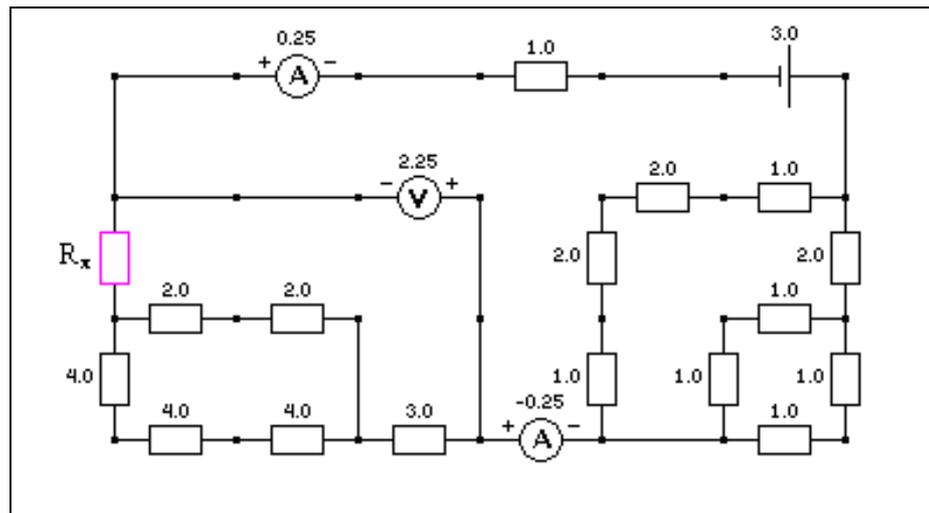


Рис.13. Схема №10 (вариант 10).

- 1.3.Получите у преподавателя допуск к выполнению лабораторной работы.
- 1.4.Откройте компьютерную модель "Цепи постоянного тока" (при открытии экран модели чист).
- 1.5.Соберите схему, соответствующую номеру вашего варианта, устанавливая соответствующие значения источника тока и всех сопротивлений (включая вычисленное вами значение  $R_x$ ).

1.6.Нажмите кнопку "Счет".

1.7.Проверьте соответствие значение показаний амперметров и вольтметров собранной вами схемы в режиме "Счет" с численными значениями схемы, соответствующей вашему варианту.

## Эксперимент 2

2.1.Перерисуйте в конспект схему №11 (рис.14). При подготовке к лабораторной работе обратите внимание, какие приборы регистрируют значение величины силы тока и напряжения на сопротивлении  $R_i$  .

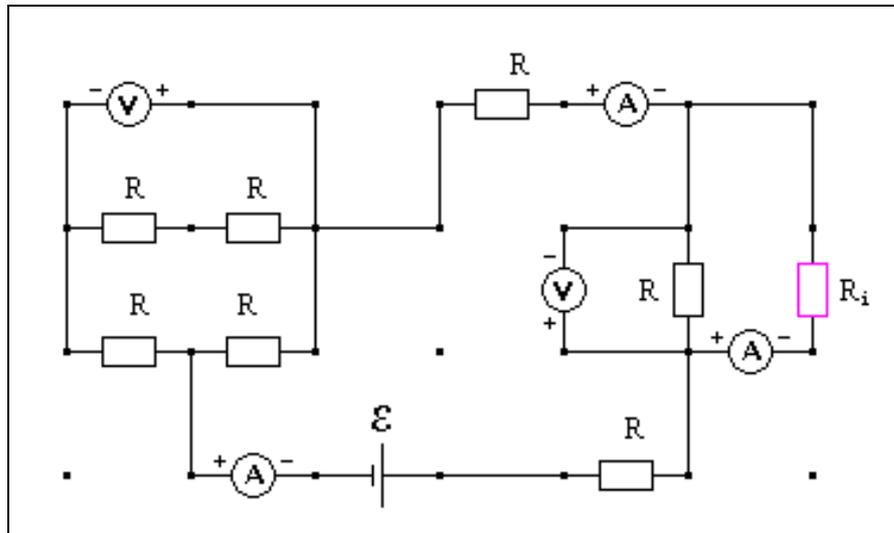


Рис.14. Схема №11.

2.2. Получив у преподавателя допуск к выполнению лабораторной работы, откройте компьютерную модель «Цепи постоянного тока».

2.3. Соберите на чистом экране компьютерной модели схему №11, устанавливая значения сопротивлений  $R = 1$  Ом.

2.4. Установите значение сопротивления  $R_i = R_1$ , указанное в таблице1 для вашего варианта.

Таблица 1.

**Значения сопротивления  $R_i$  (не перерисовывать).**

Вариант Значения $R_i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R_1$ , Ом	1,5	4,5	2	2,2	4	3	6,2	2,2	1,	3,6
$R_2$ , Ом	2,5	7	3,5	6,5	5,5	8,8	7,3	4,4	4,7	5,8
$R_3$ , Ом	6	9	5,7	8,1	7,5	10	8,4	7	9,7	9,2

Таблица 2.

**Результаты измерений напряжения и силы тока на сопротивлении  $R_1$ =**

$\mathcal{E}$ , В	0	2	4	6	8	10
U, В						
I, А						

2.5. Изменяя значения э.д.с.  $\mathcal{E}$  от 0 до 10 В (с шагом 2 В), снимите показания амперметра и вольтметра (в режиме "Счет") на участке двух параллельно соединенных проводников и запишите их в таблицу 2.

2.6. Повторите пункт 2.5. для других значений сопротивления  $R_i$  из таблицы 1 для вашего варианта.

2.7. Запишите результаты измерений в таблицы 3 и 4, составив их аналогично таблице 2, для сопротивлений  $R_2$  и  $R_3$ .

**Обработка результатов измерений**

1. Выведите формулу зависимости силы тока, протекающего по однородному участку цепи сопротивлением  $R_i$ , от величины э.д.с.  $\mathcal{E}$  источника тока в замкнутой цепи для схемы №11 (рис.14).

2. Постройте на одном листе вольтамперные характеристики  $U = f(I)$  (график зависимости величины напряжения на однородном участке электрической цепи от силы тока на этом участке) при разных значениях сопротивления  $R_i$ .

3. Сделайте выводы: а) как величина э.д.с.  $\mathcal{E}$  источника тока влияет на силу тока протекающего по однородному участку цепи сопротивлением  $R_i$ ? б) как влияет на вольтамперную характеристику однородного участка электрической цепи величина сопротивления этого участка?

## Библиографический список

### *Основной*

*Савельев И. В.* Курс общей физики: В 5 кн. М: АСТ: Астрель, 2006. Кн. 2.

*Капуткин Д.Е., Шустиков А.Г.* Физика. Обработка результатов измерений при выполнении лабораторных работ. (№ 805). М.: МИСиС. «Учеба». 2007.

### *Дополнительный*

*Калашиников С.Г.* Электричество. Физматлит, 2006.

*Сивухин Д.В.* Общий курс физики. Физматлит, 2004. Т.2.

## Контрольные вопросы

1. Что такое электрический ток? Дайте определение силы тока. В каких единицах измеряют силу тока в СИ?
2. Что называют напряжением  $U$  на участке цепи? Что такое э.д.с.? В каких единицах измеряют напряжение и э.д.с. в СИ?
3. Нарисуйте: а) однородный участок цепи; б) неоднородный участок цепи; в) замкнутую цепь. Запишите закон Ома для этих цепей и поясните физический смысл величин в записанных формулах.

4. Задача. Вольтметр, включенный в цепь последовательно с сопротивлением  $R_1$ , показал напряжение  $U_1 = 198$  В, а при включении последовательно с сопротивлением  $R_2 = 2 R_1$  показал  $U_2 = 180$  В. Определить сопротивление  $R_1$  и напряжение в сети, если сопротивление вольтметра  $R_v = 900$  Ом.

## Лабораторная работа № 2 – 14к

### МАГНИТНОЕ ПОЛЕ СОЛЕНОИДА

Компьютерные модели «Магнитное поле кругового витка с током»,  
«Магнитное поле соленоида»  
в сборнике компьютерных моделей «Открытая физика»  
раздел «Электричество и магнетизм»

#### 1. Цель работы

- Знакомство с компьютерным моделированием магнитного поля кругового витка (контура) с током и соленоида.
- Экспериментальное подтверждение закономерностей для магнитного поля кругового витка (контура) с током и соленоида.
- Экспериментальное определение величины магнитной постоянной.

#### Методика виртуального эксперимента

В данной работе используются компьютерные модели, основанные на том, что силовое магнитное поле изображают с помощью *линий магнитной индукции* — *воображаемых линий, в любой точке которых вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  направлен по касательной к ним.*

Силовые линии магнитного поля имеют вид концентрических окружностей, центром которых является проводник с током (источник магнитного поля), и по силовым линиям в магнитном поле располагаются железные опилки или оси маленьких магнитных стрелок. Направление силовых линий определяется *правилом векторного произведения (правилом правого винта): если поступательное движение винта соответствует*

направлению тока в проводнике, то направление вращения винта задает направление линий магнитной индукции (силовых линий магнитного поля).

Как и в случае электрического поля, густоту магнитных линий договорились выбирать такой, чтобы число линий, пересекающих некоторую единичную площадку, расположенную перпендикулярно им, было равно величине индукции магнитного поля в этом месте. Чем гуще будут располагаться в некоторой области магнитные линии, тем больше там индукция магнитного поля. Подчеркнем еще раз, что магнитные линии всегда замкнуты сами на себя, а если на рисунке магнитная линия не замкнута, значит, на нем изображена лишь часть ее.

Если во всех точках пространства вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  имеет одинаковое по модулю значение и одинаковое направление, то такое магнитное поле называют *однородным*. В случае однородного магнитного поля вектор  $\vec{B}$  направлен вдоль линий магнитной индукции.

**Индукция магнитного поля кругового тока.** Величина индукции  $B$  магнитного поля в центре кругового тока (*т. е. проводник имеет форму окружности*) радиусом  $R$  с силой тока  $I$  определяется формулой

$$B = \mu_0 \mu \frac{I}{2R}. \quad (1)$$

*Индукция магнитного поля в центре кругового тока прямо пропорциональна силе тока и обратно пропорциональна его радиусу.*

Индукция магнитного поля на оси кругового витка с током  $I$  радиусом  $R$  на расстоянии  $r$  от центра витка определяется формулой

$$B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{IS}{(R^2 + r^2)^{3/2}}. \quad (2)$$

В формулах (1) и (2)  $\mu_0 = 1.26 \cdot 10^{-6} \text{ Н/А}^2$  (или Гн/м) — *магнитная постоянная*, величина которой зависит только от выбора системы единиц (здесь она дана в СИ),  $\mu$  —

относительная магнитная проницаемость среды, в которой располагается проводник с током (для вакуума или воздуха  $\mu = 1$ ).

Переписав формулу (2) для  $\mu = 1$  в виде

$$B = \frac{\mu_0 IS}{4\pi} \frac{1}{(R^2 + r^2)^{3/2}}, \quad (3)$$

можно сделать вывод, что для постоянного значения силы тока ( $I = const$ ) величина магнитной индукции магнитного поля на оси кругового витка с током  $I$  радиусом  $R$  на расстоянии  $r$  от центра витка линейно зависит от величины  $\left( \frac{1}{(R^2 + r^2)^{3/2}} \right)$ ,

т.е.  $B = f\left(\frac{1}{(R^2 + r^2)^{3/2}}\right)$ , что позволяет экспериментально определить величину

магнитной постоянной  $\mu_0$ , воспользовавшись формулой

$$\mu_0 = \frac{4\pi}{IS} \frac{\Delta(B)}{\Delta\left(\frac{1}{(R^2 + r^2)^{3/2}}\right)}, \quad (4)$$

где  $\Delta B$  - это приращение функции при соответствующем приращении аргумента

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

**Магнитное поле соленоида.** Для получения большой величины магнитной индукции используют не один виток кругового тока, а *соленоид* — *равномерно намотанную на цилиндрический каркас проволочную спираль, по которой течет электрический ток.* Иными словами, *соленоидом можно считать совокупность круговых токов одинакового диаметра, имеющих общую ось.*

Для магнитного поля справедлив *принцип суперпозиции: магнитное поле (магнитная индукция которого  $\vec{B}$ ), порождаемое несколькими движущимися зарядами*

(токами), равно векторной сумме магнитных индукций полей  $\vec{B}_i$ , порождаемых каждым зарядом (током) в отдельности:

$$\vec{B} = \sum_i \vec{B}_i \quad (5)$$

Рассмотрим соленоид длиной  $L$ , содержащий  $N$  витков, по которому течет ток  $I$ . Если длина соленоида  $L$  во много раз больше диаметра его витков, то можно рассматривать этот соленоид как бесконечно длинный и магнитное поле внутри его можно считать однородным. Магнитная индукция поля внутри соленоида в вакууме вычисляется по формуле

$$B = \mu_0 \frac{NI}{L}, \quad (6)$$

где  $N$  – число витков соленоида,  $L$  – длина соленоида.

Откройте поочередно компьютерную модель «Магнитное поле кругового витка с током», затем модель «Магнитное поле соленоида». Внимательно рассмотрите модели, найдите все регуляторы и другие основные элементы. (Если вы забыли, как работать с системой компьютерного моделирования, прочитайте ВВЕДЕНИЕ ещё раз).

Установите любое значение величины силы тока  $I$  (величину силы тока  $I$  можно менять от 0 до 20А) и посмотрите изображение магнитного поля при флажках «Силловые линии» и «Железные опилки». Зарисуйте поле эксперимента в конспект. Не изменяя величину тока, поменяйте направление тока (например, значение величины тока  $I = 5\text{А}$  измените на  $I = -5\text{А}$ ) и посмотрите изображение магнитного поля при флажках «Силловые линии» и «Железные опилки». Сделайте вывод (что изменилось в поле компьютерной модели и почему?).

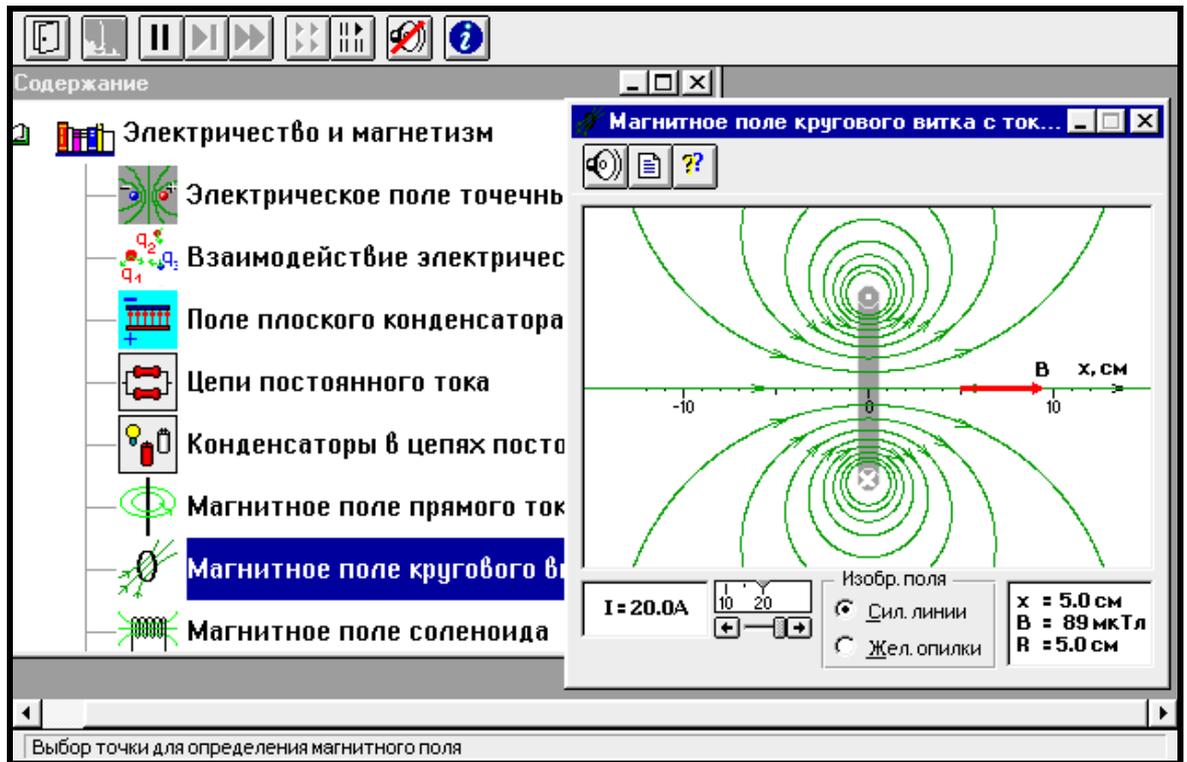


Рис. 1. Окно компьютерной модели «Магнитное поле кругового витка с током».

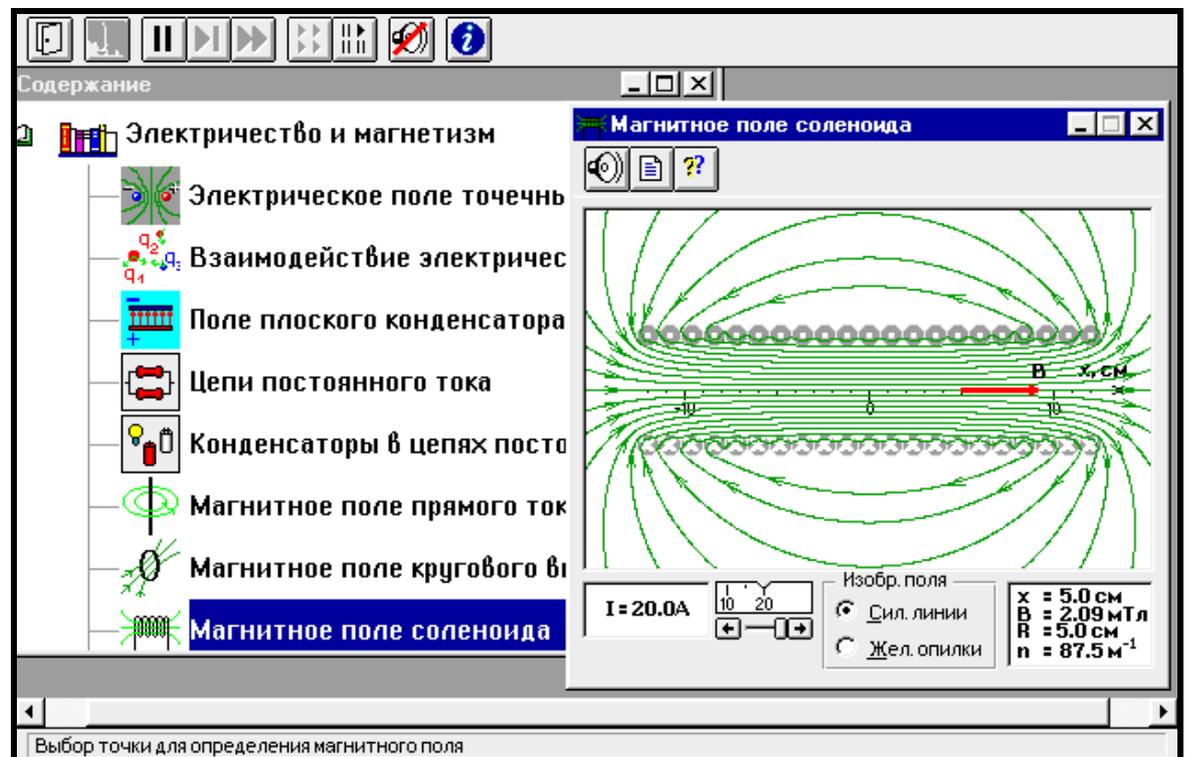


Рис. 2. Окно компьютерной модели «Магнитное поле соленоида».

Точка поля для исследования магнитного поля выбирается установкой мыши в поле эксперимента, при этом на экране появляется изображение руки, которую нужно перемещать в заданном направлении на необходимое расстояние, а в правом нижнем углу экрана модели указывается численное значение расстояния и величины индукции магнитного поля. Например, на рис.1 для  $I = 20\text{А}$  на расстоянии  $r = 5.0\text{ см}$  величина индукции магнитного поля  $B = 89\text{мкТл}$ . **Обратите внимание, что на рисунке модели  $r$  – это величина  $x$ , которая показывается в правой нижней части окна компьютерной модели, а радиус витка  $R = 5.0\text{ см}$  остаётся постоянным.**

## Порядок выполнения работы

### Эксперимент 1

1. Запустите, дважды щелкнув мышью, виртуальный эксперимент «Магнитное поле кругового витка с током». Выберите режим "Силовые линии".

**Все эксперименты необходимо выполнять при установленном флажке «Силовые линии».**

2. Зацепив мышью, перемещайте движок регулятора тока. Зафиксируйте величину тока  $I_1$ , указанную в таблице 1 для вашего варианта.

3. Перемещая мышью «руку» по оси витка, нажмите левую кнопку мыши на расстоянии  $r = 2\text{ см}$  от центра витка (значения расстояния  $r$  указаны в таблице 2).

4. Запишите значение величины индукции магнитного поля  $B_1$  в таблицу 2.

5. Устанавливая расстояния от центра витка 4, 6, 8 и 10 см, измерьте величину индукции магнитного поля  $B_1$  и запишите полученные значения в таблицу 2.

6. Повторите измерения для трех других значений тока из таблицы 1.

Таблица 1.

**Значения величины тока (не перерисовывать).**

Вариант Значения $I_i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_1, A$	10	5	15	-20	-10	-5	20	5	-15	-20
$I_2, A$	-5	10	20	-15	-5	-10	15	20	-10	20
$I_3, A$	20	15	-10	-5	15	-15	-10	-10	5	-10
$I_4, A$	-15	20	5	-10	20	-20	-5	-15	10	-5

Таблица 2.

**Результаты измерений магнитной индукции поля кругового витка с током**

$r, \text{ см}$	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>10</b>
$1/r, \text{ м}^{-1}$					
$B_1, \text{ Тл}$					
$B_2, \text{ Тл}$					
$B_3, \text{ Тл}$					
$B_4, \text{ Тл}$					

**Эксперимент 2**

1. Закройте окно эксперимента 1, нажав кнопку в правом верхнем углу внутреннего окна. Запустите, дважды щелкнув мышью, виртуальный эксперимент «Магнитное поле соленоида». Выберите режим "Силовые линии".

**Все эксперименты необходимо выполнять при установленном флажке «Силовые линии».**

2. Зацепив мышью, перемещайте движок регулятора тока. Зафиксируйте величину тока  $I_1$ , указанную в таблице 1 для вашего варианта.

3. Перемещая мышью «руку» по оси соленоида, нажмите левую кнопку мыши на расстоянии  $r = 2\text{ см}$  от центра соленоида (значения расстояния  $r$  указаны в таблице 3).
4. Запишите значение величины индукции магнитного поля  $B_1$  в таблицу 3.
5. Устанавливая расстояния от центра витка 4, 6, 8 и 10 см, измерьте величину индукции магнитного поля соленоида  $B_1$  и запишите полученные значения в таблицу 3.
6. Повторите измерения для трех других значений тока из таблицы 1.

Таблица 3.

### Результаты измерений магнитной индукции поля соленоида

r, см	2	4	6	8	10
B <sub>1</sub> , Тл					
B <sub>2</sub> , Тл					
B <sub>3</sub> , Тл					
B <sub>4</sub> , Тл					

### Обработка результатов измерений

1. Вычислите и запишите в таблицу 2 значения для второй строки (обратите внимание на размерности величин в строках).

2. Постройте на одном листе графики зависимости индукции магнитного поля (B) на оси витка с током на расстоянии  $r$  от его центра в зависимости от  $\left( \frac{1}{(R^2 + r^2)^{3/2}} \right)$

для каждого тока.

3. Определите магнитную постоянную (для каждого графика), используя формулу

$$\mu_0 = \frac{4\pi}{I_i S} \frac{\Delta(B)}{\Delta\left(\frac{1}{(R^2 + r^2)^{3/2}}\right)}, \quad (4)$$

где  $I_i$  - величина силы тока,  $\Delta B$  и  $\Delta \left( \frac{1}{(R^2 + r^2)^{3/2}} \right)$  - приращение функции и

аргумента для этого тока, считая площадь витка по формуле  $S = \pi R^2$ , где  $R$  – это радиус витка.

4. Вычислите среднее значение магнитной постоянной, абсолютную и относительную ошибки.
5. Запишите результат определения величины магнитной постоянной и сравните его с табличным значением.
6. Проанализируйте графики.
7. На втором листе постройте графики зависимости индукции магнитного поля ( $B$ ) на оси соленоида от расстояния  $r$  до его центра для каждого тока.
8. Для магнитного поля соленоида при каждом токе из графика определите протяженность области однородности  $\Delta r$ , в которой величина магнитной индукция меняется не более, чем на 10% от максимального значения.
9. Запишите ответы и проанализируйте ответ и графики

## Библиографический список

### *Основной*

*Савельев И. В.* Курс общей физики: В 5 кн. М: АСТ: Астрель, 2006. Кн. 2.

*Капуткин Д.Е., Шустиков А.Г.* Физика. Обработка результатов измерений при выполнении лабораторных работ. (№ 805). М.: МИСиС. «Учеба». 2007.

### *Дополнительный*

*Калашиников С.Г.* Электричество. Физматлит, 2006.

*Сивухин Д.В.* Общий курс физики. Физматлит, 2004. Т.2.

## Контрольные вопросы

1. Что такое магнитное поле? Назовите источники магнитного поля.
2. Запишите закон Био-Савара-Лапласа и поясните физический смысл величин, в него входящих (используйте для этого рисунок).
3. Нарисуйте силовые линии (с указанием их направлений) и запишите формулу вычисления магнитной индукции для магнитного поля кругового витка (контура) с током в центре и вдоль его оси на некотором расстоянии от плоскости витка (контура).
4. Сформулируйте принцип суперпозиции для магнитных полей.
5. Что такое соленоид и для чего он используется? Является ли магнитное поле внутри соленоида везде однородным?
6. Используя теорему о циркуляции вектора магнитной индукции, выведите формулу расчета магнитной индукции поля внутри соленоида.
7. Задача. Найти магнитную индукцию на оси тонкого проволочного кольца радиусом  $R = 10\text{см}$  в точке, расположенной на расстоянии  $d = 20\text{см}$  от центра кольца, если при протекании тока по кольцу в центре кольца магнитная индукция  $B_0 = 50\text{ мкТл}$ .

## Лабораторная работа № 2 – 16к

### ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Компьютерная модель «Электромагнитная индукция»  
в сборнике компьютерных моделей «Открытая физика»  
раздел «Электричество и магнетизм»

#### Цель работы

- Знакомство с компьютерным моделированием явления электромагнитной индукции.
- Экспериментальное подтверждение закономерностей электромагнитной индукции.

#### Методика виртуального эксперимента

В данной работе используется компьютерная модель, основанная на законе электромагнитной индукции (закон Фарадея): э.д.с.  $\mathcal{E}_i$  электромагнитной индукции в замкнутом контуре численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока сквозь поверхность, ограниченную этим контуром:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt} . \quad (1)$$

В замкнутом проводящем контуре при изменении магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром, возникает *электрический ток*, получивший название *индукционного*.

Знак «минус» в формуле (1) является «математическим выражением» правила Ленца: *индукционный ток в замкнутом контуре имеет такое направление, что создаваемое им магнитное поле препятствует изменению магнитного потока, вызывающему этот индукционный ток.*

Магнитным потоком  $\Phi$  сквозь поверхность  $S$  называют

$$\Phi = \int_S \vec{B} d\vec{S} = \int_S \vec{B} \vec{n} dS = |\vec{B}| S \cos \alpha, \quad (2)$$

где  $\alpha$  - это угол между вектором индукции магнитного поля  $\vec{B}$  и нормалью  $\vec{n}$  к этой поверхности ( $d\vec{S} = dS\vec{n}$ ).

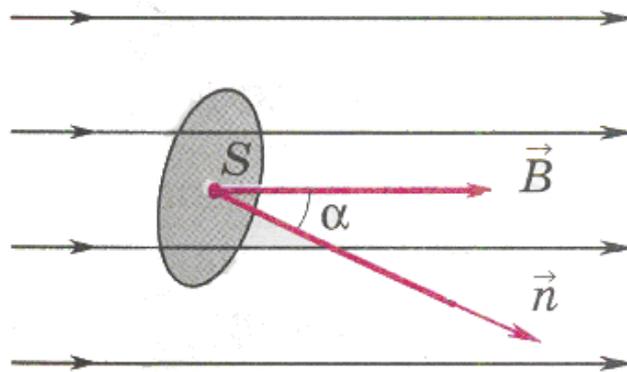


Рис. 1. Плоский контур площадью  $S$  в магнитном поле индукцией  $\vec{B}$ , положительная нормаль  $\vec{n}$  к которому составляет с вектором  $\vec{B}$  угол  $\alpha$ .

В компьютерной модели явление электромагнитной индукции наблюдают при изменении потока магнитной индукции сквозь контур вследствие изменения площади контура (из-за движения одного из проводников контура в постоянном магнитном поле), плоскость которого расположена перпендикулярно силовым линиям магнитного поля - в этом случае угол  $\alpha$  между вектором индукции магнитного поля  $\vec{B}$  и нормалью  $\vec{n}$  поверхности равен нулю:

$$d\Phi = B dS, \quad (3)$$

где  $dS$  - изменение площади контура за интервал времени  $dt$  в результате движения проводящей перемычки длиной  $L$  со скоростью  $\vec{V}$  по параллельным проводникам, замкнутым с одной стороны.

Согласно закону Ома, мгновенное значение силы тока в контуре определяется формулой

$$I = \frac{|\mathcal{E}_i|}{R} = \frac{1}{R} \frac{d\Phi}{dt}. \quad (4)$$

где  $R$  - это сопротивление контура.

Откройте компьютерную модель «Электромагнитная индукция». Внимательно рассмотрите модель, найдите все регуляторы и другие основные элементы. (Если вы забыли, как работать с системой компьютерного моделирования, прочитайте ВВЕДЕНИЕ ещё раз). Зарисуйте поле модели в конспект.

Компьютерная модель «Электромагнитная индукция» позволяет устанавливать величину длины перемычки  $L$  и её сопротивление  $R$ , величину и направление скорости движения перемычки  $v$  и индукции магнитного поля  $B$ , в котором расположен замкнутый контур. В модели есть две кнопки - "Старт" и "Выбор". При нажатой кнопке "Выбор" задают параметры величин для виртуального эксперимента и при этом в левом нижнем углу окна модели (рис.2) регистрируется величина магнитного потока  $\Phi$ , пронизывающего замкнутый контур. Нажатие кнопки "Старт" запускает виртуальный эксперимент, в процессе которого в левом нижнем углу окна модели появляются значения тока  $I$ , э.д.с.  $\mathcal{E}$  и времени  $t$ . По окончании эксперимента магнитный поток равен нулю (рис.3). При произвольных параметрах запустите эксперимент, щелкнув мышью по кнопке «Старт». Наблюдайте движение перемычки и изменение при этом магнитного потока  $\Phi$  (цифры внизу окна).

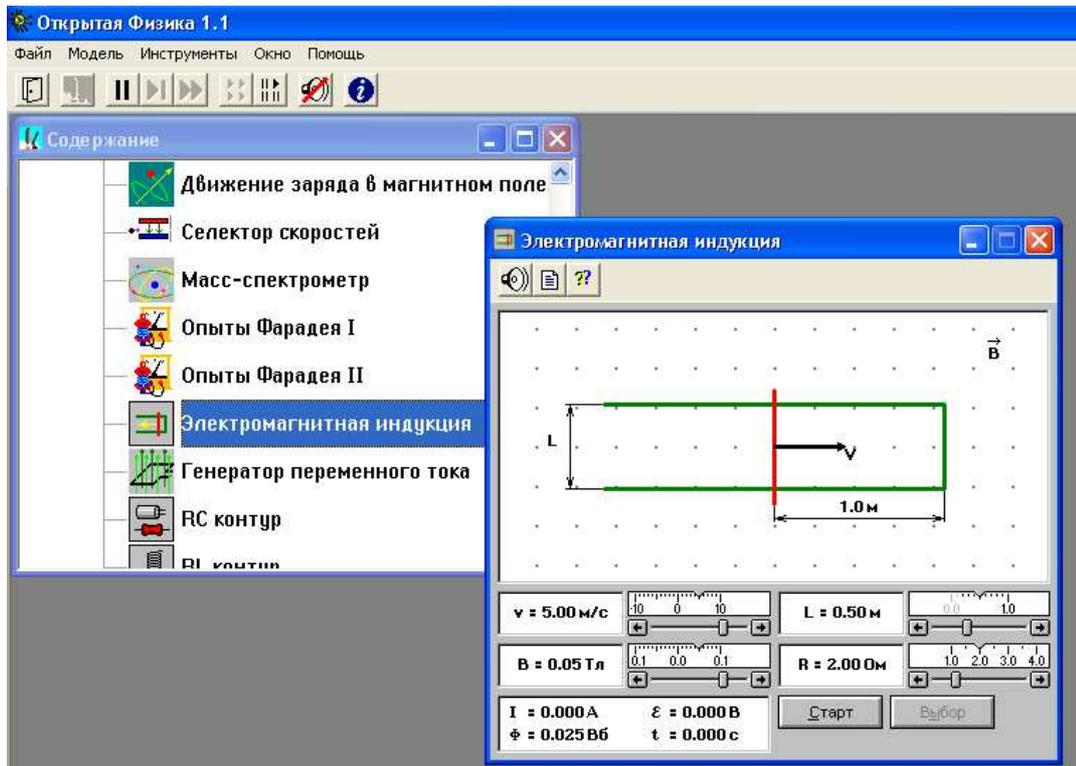


Рис. 2. Окно компьютерной модели «Электромагнитная индукция» в режиме "Выбор".

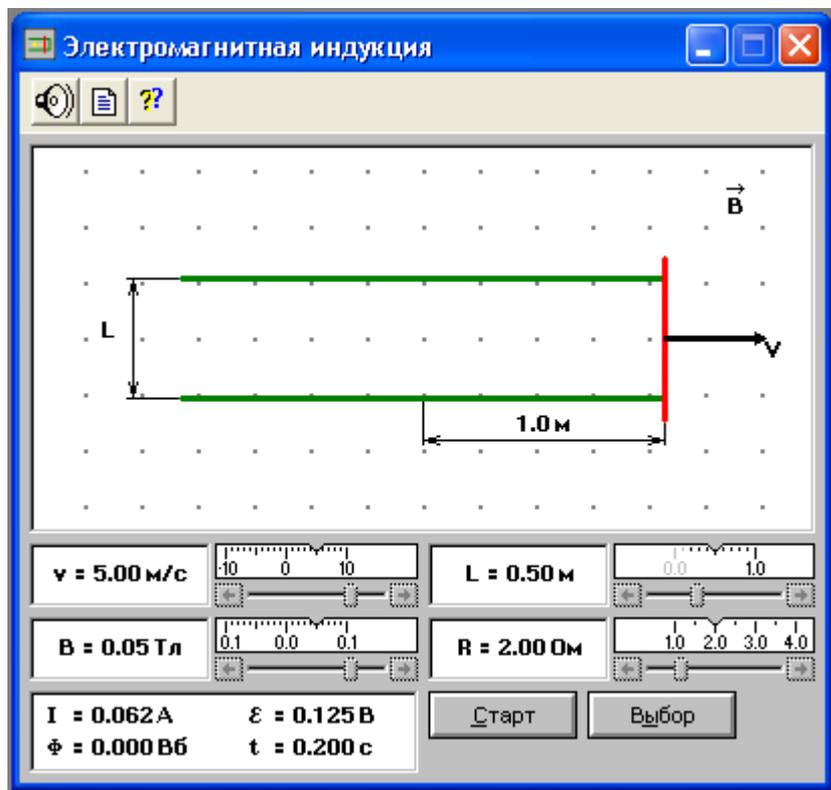


Рис.3. Окно компьютерной модели «Электромагнитная индукция» в режиме "Старт".

## Порядок выполнения работы

**Перед проведением эксперимента решите задачу, получив уравнение для тока в общем виде.**

**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 пренебречь.

### Эксперимент 1

1. Запустите, дважды щелкнув мышью, виртуальный эксперимент «Электромагнитная индукция». Выберите режим "Выбор".
2. Зацепив мышью, поочередно перемещайте движки регуляторов  $L$  – расстояния между проводами,  $R$  – сопротивления перемычки,  $B_1$  – величины индукции магнитного поля и зафиксируйте их значения, указанные в таблице 1.
3. Установив указанное в таблице 2 значение скорости движения перемычки  $V$ (м/с), нажмите левую кнопку мыши, когда ее маркер размещен над кнопкой «Старт». Занесите значение э.д.с. и тока  $I$  в таблицу 2. Повторите измерения для других значений скорости из таблицы 2.
4. Повторите измерения э.д.с. и тока  $I$  в зависимости от скорости движения перемычки (согласно пунктам 1 - 3) для двух других значений  $B_2$  и  $B_3$  индукции магнитного поля, выбирая их из таблицы 1. Полученные результаты запишите в таблицы, составив их аналогично таблице 2.

Таблица 1.

**Значения исходных характеристик для эксперимента 1 (не перерисовывать).**

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R, Ом	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	1
L, м	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	0,5
$B_1$ , Тл	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
$B_2$ , Тл	-0,1	-0,09	-0,08	-0,07	-0,06	-0,05	-0,04	-0,03	-0,02	-0,01
$B_3$ , Тл	0,03	0,05	0,01	0,02	0,07	-0,08	-0,01	0,1	-0,05	0,06

Таблица 2.

**Результаты измерения э.д.с.  $\mathcal{E}_i$  и тока I при  $B_1 =$  Тл.**

V (м/с)	-10	-5	5	10
э.д.с. $\mathcal{E}_i$ , В				
I, мА				

**Эксперимент 2**

1. Запустите, дважды щелкнув мышью, виртуальный эксперимент «Электромагнитная индукция». Выберите режим "Выбор".
2. Зацепив мышью, поочередно перемещайте движки регуляторов L – расстояния между проводами, R – сопротивления перемычки,  $V_1$ (м/с) - скорости движения перемычки и зафиксируйте их значения, указанные в таблице 3.
3. Установив указанное в таблице 4 значение величины индукции магнитного поля  $B_1$ (Тл), нажмите левую кнопку мыши, когда ее маркер размещен над кнопкой «Старт». Занесите значение э.д.с. тока I в таблицу 4. Повторите измерения для других значений величины индукции магнитного поля из таблицы 4.
4. Повторите измерения э.д.с. и тока I в зависимости от значений величины индукции магнитного (согласно пунктам 1 - 3) для двух других значений  $V_2$  и  $V_3$

скорости движения переключки, выбирая их из таблицы 3. Полученные результаты запишите в таблицы, составив их аналогично таблице 4.

Таблица 3.

**Значения исходных характеристик для эксперимента 2 (не перерисовывать).**

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R, Ом	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	1
L, м	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	0,5
V <sub>1</sub> , (м/с)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V <sub>2</sub> , (м/с)	2	4	6	8	10	2	3	-4	-3	-2
V <sub>3</sub> , (м/с)	-2	-4	-3	-2	-2	-3	-1	2	3	5

Таблица 4.

**Результаты измерения э.д.с.  $\mathcal{E}_i$  и тока I при V<sub>1</sub> = (м/с)**

B, Тл	0,05	0,1	-0,1	-0,05
э.д.с. $\mathcal{E}_i$ , В				
I, мА				

### Эксперимент 3

1. Запустите, дважды щелкнув мышью, виртуальный эксперимент «Электромагнитная индукция». Выберите режим "Выбор".

2. Зацепив мышью, поочередно перемещайте движки регуляторов R – сопротивления переключки, V(м/с) - скорости движения переключки, B<sub>1</sub> – величины индукции магнитного поля и зафиксируйте их значения, указанные в таблице 5.

3. Установив указанное в таблице 6 значение L – расстояния между проводами, нажмите левую кнопку мыши, когда ее маркер размещен над кнопкой «Старт». Занесите значение э.д.с. и тока I в таблицу 6. Повторите измерения для других значений величины расстояния между проводниками из таблицы 6.

4. Повторите измерения э.д.с. и тока I в зависимости от расстояния между проводами (согласно пунктам 1 - 3) для двух других значений B<sub>2</sub> и B<sub>3</sub> индукции

магнитного поля, выбирая их из таблицы 5. Полученные результаты запишите в таблицы, составив их аналогично таблице 6.

Таблица 5.

**Значения исходных характеристик для эксперимента 3 (не перерисовывать).**

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R, Ом	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	1
V, (м/с)	1	-2	3	-4	5	-6	7	-8	9	-10
B <sub>1</sub> , Тл	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
B <sub>2</sub> , Тл	-0,1	-0,09	-0,08	-0,07	-0,06	-0,05	-0,04	-0,03	-0,02	-0,01
B <sub>3</sub> , Тл	0,03	0,05	0,01	0,02	0,07	-0,08	-0,01	0,1	-0,05	0,06

Таблица 6.

**Результаты измерения э.д.с.  $\mathcal{E}_i$  и тока I при  $B_1 =$  Тл.**

L, м	0,2	0,4	0,6	0,8
э.д.с. $\mathcal{E}_i$ , В				
I, мА				

## Обработка результатов измерений

### Эксперимент 1

1. Постройте на одном листе графики зависимости тока индукции от скорости движения перемычки  $I = f(V)$  при трех значениях индукции магнитного поля.

2. Для каждой прямой определите тангенс угла наклона по формуле

$$\operatorname{tg}(\varphi)_{\text{экс}} = \frac{\Delta I}{\Delta V},$$

где  $\frac{\Delta I}{\Delta V}$  - отношение приращения функции к соответствующему приращению аргумента .

3. Вычислите теоретическое значение тангенса для каждой прямой по формуле

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

4. Заполните таблицу результатов измерений

Индукция магнитного поля	$\text{tg}(\varphi)_{\text{эксп}} \text{ (Ас/м)}$	$\text{tg}(\varphi)_{\text{теор}} \text{ (Ас/м)}$
$B_1 = \quad \text{Т}$		
$B_2 = \quad \text{Т}$		
$B_3 = \quad \text{Т}$		

5. Постройте на одном листе графики зависимости э.д.с.  $\mathcal{E}_i$  от скорости движения переключки  $\mathcal{E}_i = f(V)$  при трех значениях индукции магнитного поля.

6. Сделайте выводы по графикам и результатам измерений.

### Эксперимент 2

1. Постройте на одном листе графики зависимости тока индукции от величины индукции магнитного поля  $I = f(B)$  при трех значениях скорости движения переключки.

2. Для каждой прямой определите тангенс угла наклона по формуле

$$\text{tg}(\varphi)_{\text{эксп}} = \frac{\Delta I}{\Delta B},$$

где  $\frac{\Delta I}{\Delta B}$  - отношение приращения функции к соответствующему приращению аргумента .

3. Вычислите теоретическое значение тангенса для каждой прямой по формуле

$$\text{tg}(\varphi)_{\text{теор}} = \frac{VL}{R}.$$

4. Заполните таблицу результатов измерений

Скорость движения переключки	$\text{tg}(\varphi)_{\text{эксп}} \text{ (А/Т)}$	$\text{tg}(\varphi)_{\text{теор}} \text{ (А/Т)}$
$V_1 = \quad \text{м/с}$		
$V_2 = \quad \text{м/с}$		
$V_3 = \quad \text{м/с}$		

5. Постройте на одном листе графики зависимости э.д.с.  $\mathcal{E}_i$  от величины индукции магнитного поля  $\mathcal{E}_i = f(B)$  при трех значениях скорости движения переключки .

6. Сделайте выводы по графикам и результатам измерений.

### Эксперимент 3

1. Постройте на одном листе графики зависимости тока индукции от величины длины перемычки  $I = f(L)$  при трех значениях индукции магнитного поля.

2. Для каждой прямой определите тангенс угла наклона по формуле

$$\operatorname{tg}(\varphi)_{\text{эксп}} = \frac{\Delta I}{\Delta L},$$

где  $\frac{\Delta I}{\Delta L}$  - отношение приращения функции к соответствующему приращению аргумента.

3. Вычислите теоретическое значение тангенса для каждой прямой по формуле

$$\operatorname{tg}(\varphi)_{\text{теор}} = \frac{BV}{R}.$$

4. Заполните таблицу результатов измерений

Индукция магнитного поля	$\operatorname{tg}(\varphi)_{\text{эксп}}$ (А/м)	$\operatorname{tg}(\varphi)_{\text{теор}}$ (А/м)
$B_1 = \quad \Gamma$		
$B_2 = \quad \Gamma$		
$B_3 = \quad \Gamma$		

5. Постройте на одном листе графики зависимости э.д.с.  $\mathcal{E}_i$  от величины длины перемычки  $\mathcal{E}_i = f(L)$  при трех значениях индукции магнитного поля.

6. Сделайте выводы по графикам и результатам измерений.

### Библиографический список

#### Основной

*Савельев И. В.* Курс общей физики: В 5 кн. М: АСТ: Астрель, 2006. Кн. 2.

*Капуткин Д.Е., Шустиков А.Г.* Физика. Обработка результатов измерений при выполнении лабораторных работ. (№ 805). М.: МИСиС. «Учеба». 2007.

#### Дополнительный

*Калашников С.Г.* Электричество. Физматлит, 2006.

*Сивухин Д.В.* Общий курс физики. Физматлит, 2004. Т.2.

## Контрольные вопросы

1. Что называется магнитным потоком? Перечислите условия, при которых (при неизменной площади поверхности): а) магнитный поток равен нулю? б) магнитный поток принимает максимальное значение?
2. Назовите все способы создания переменного магнитного потока. Поясните, как изменяется со временем магнитный поток в данной работе?
3. Поясните, что такое «явление электромагнитной индукции»?
4. Сформулируйте и запишите закон Фарадея для электромагнитной индукции. Поясните правило Ленца.
5. Запишите закон Ома для индукционного тока.
6. Поясните причину возникновения разности потенциалов на концах проводника, движущегося с постоянной скоростью в однородном магнитном поле.
7. Задача. Две гладкие замкнутые металлические шины, расстояние между которыми равно 30 см, со скользящей перемычкой, которая может двигаться без трения (под действием силы тяжести), находятся в однородном магнитном поле с индукцией  $B=0,1$  Тл, перпендикулярном плоскости контура. Перемычка массой  $m = 5$  г скользит вниз с постоянной скоростью  $V = 0,5$  м/с. Определите сопротивление перемычки, пренебрегая самоиндукцией контура и сопротивлением остальной части контура.