



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

В.А.Степанова

ФИЗИКА

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

Учебно-методическое пособие

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

**"Национальный исследовательский технологический университет
"МИСиС"**

Кафедра Физики

В.А. СТЕПАНОВА

ФИЗИКА

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

Учебно-методическое пособие

Под редакцией профессора Д.Е. Капуткина

Рекомендовано редакционно-издательским советом университета

УДК 537

С79

Р е ц е н з е н т

кандидат физ. - мат. наук Осипов Ю.В.

Степанова, В.А.

Физика: электричество и магнетизм: учеб.-метод. пособие (для выполнения расчетно-графических работ); под ред. Д.Е. Капуткина– М.: Изд. Дом МИСиС, 2012. – с.

Пособие содержит теоретический материал и руководство к выполнению семи расчетно-графических работ, моделирующих фундаментальные эксперименты по курсу "Физика" раздел "Электричество и магнетизм" по темам: электростатика, электродинамика, магнитное поле и электромагнитная индукция. В каждой работе дана методика виртуального эксперимента, содержащая теоретическое введение и описание компьютерной модели, обработка результатов и вопросы для самоконтроля. Содержание работ соответствует учебной программе курса «Физика».

Программное обеспечение для расчетно-графических работ разработано фирмой "ФИЗИКОН" под руководством проф. С.М.Козеля.

Предназначено для студентов бакалавриата.

ISBN 978-5-87623-634-0

© В.А.Степанова, 2012

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....
Введение
Расчетно-графическая работа № 1- 1. Электрическое поле точечных зарядов.
Расчетно-графическая работа № 1- 2. Закон Ома для постоянного тока.....
Расчетно-графическая работа № 1- 3. Цепи постоянного тока.....
Расчетно-графическая работа № 1- 4. Магнитное поле прямого тока.....
Расчетно-графическая работа № 1- 5. Магнитное поле соленоида.....
Расчетно-графическая работа № 1- 6. Определение удельного заряда частицы методом отклонения в магнитном поле.
Расчетно-графическая работа № 1- 7. Электромагнитная индукция.....

ПРЕДИСЛОВИЕ

Преподавание курса общей физики в техническом вузе, наряду с усвоением фундаментальных знаний и законов, подкрепленных решением задач, ставит также цель привить студентам навыки и умение моделировать физические процессы и явления. Не заменяя традиционные формы обучения, применение компьютерных моделей в процессе освоения курса "Физика", дает новые технологии для процесса обучения. Компьютерные модели являются наглядным представлением экспериментов, достоверно отражают физические законы, а диапазон регулируемых параметров позволяет получать достаточное количество исследуемых состояний.

В настоящее пособие вошли описания семи расчетно-графических работ с использованием компьютерных моделей (разработанных фирмой "ФИЗИКОН"), выполняемых студентами 2-ого курса НИТУ "МИСиС" в соответствии с учебным планом по курсу "Физика" по разделу "Электричество и магнетизм".

Описание каждой работы включает в себя разделы: 1.Цель работы. 2.Методика виртуального эксперимента (с краткой теорией и описанием компьютерных моделей). 3.Порядок выполнения работы. 4.Обработка результатов измерений. 5.Контрольные вопросы для самопроверки. 6.Список литературы.

ВВЕДЕНИЕ

Для подготовки и выполнения расчетно-графических работ, в которых используются компьютерные модели, разработанные фирмой «ФИЗИКОН», необходимо на рабочем столе компьютера дважды щелкнуть левой кнопкой мыши, когда её маркер расположен на ярлыке «зелёное дерево» с надписью **Физика**. В открывшемся окне находятся папки с описанием расчетно-графических работ и сборник компьютерных моделей **«Открытая физика 1.1»**.

Для выполнения расчетно-графической работы необходимо дважды щелкнуть левой кнопкой мыши, когда ее маркер расположен над эмблемой сборника компьютерных моделей «Открытая физика 1.1.» на рабочем столе. После этого на экране появится начальная картинка этого сборника, окно которой изображено на рис. В1.

Далее необходимо выбрать раздел, указанный в расчетно-графической работе; для этого дважды щелкнете левой кнопкой мыши, установив ее маркер над названием раздела, в котором расположена данная модель. В разделе «Электричество и магнетизм» вы увидите картинку, изображенную на рис. В2.

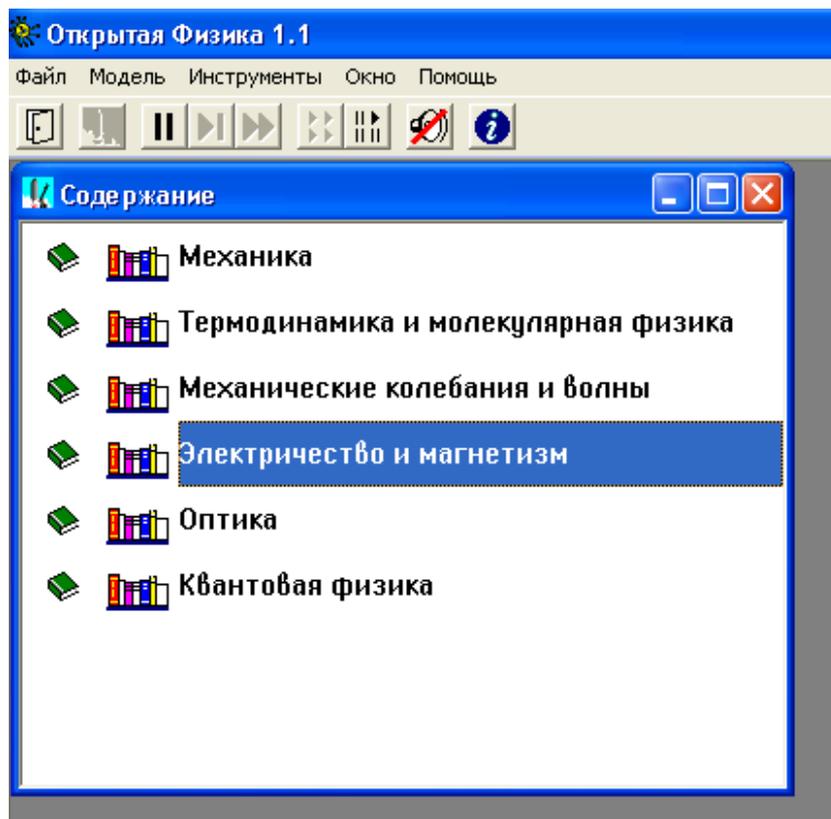


Рис. В1. Содержание сборника компьютерных моделей «Открытая физика 1.1.»

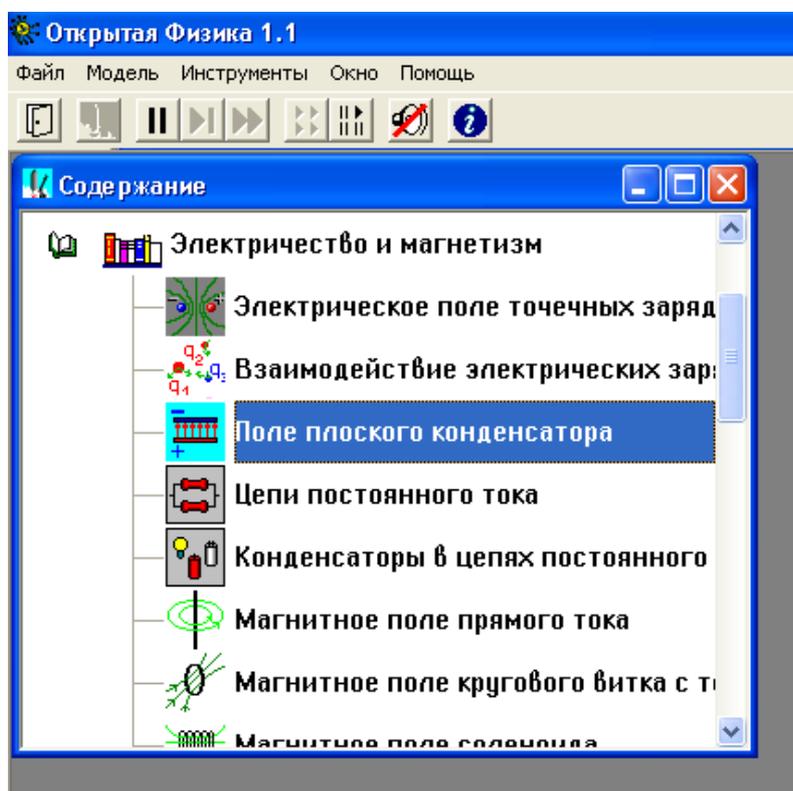


Рис.В2. Диалоговое окно раздела "Электричество и магнетизм" в сборнике компьютерных моделей «Открытая физика 1.1.».

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

Прочитав надписи во внутреннем окне, установите маркер мыши над надписью требуемой компьютерной модели и дважды коротко нажмите левую кнопку мыши. Например, для компьютерной модели «Электромагнитная индукция» в разделе "Электричество и магнетизм" окно будет выглядеть так (рис. В3):

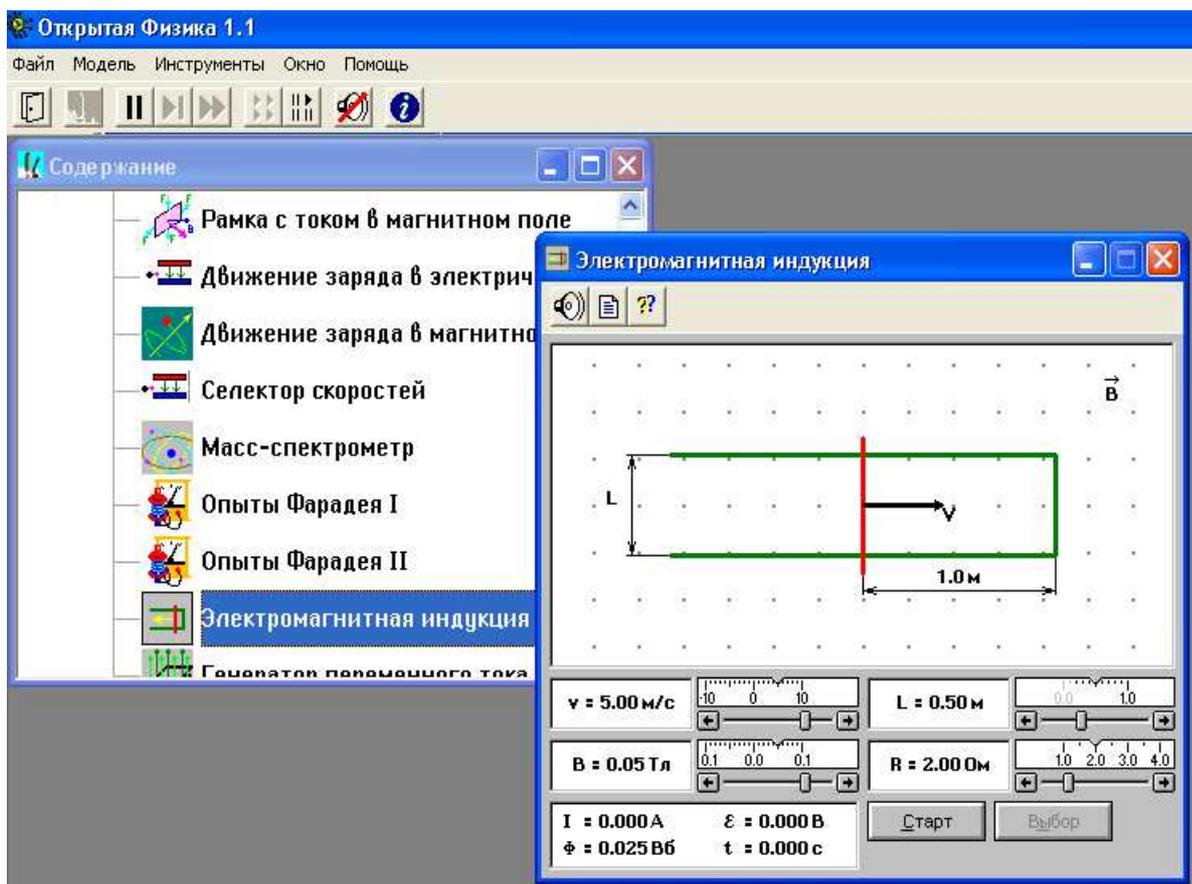


Рис.В3. Диалоговое окно компьютерной модели «Электромагнитная индукция» в разделе "Электричество и магнетизм".

Кнопки сверху картинки (под параметрами панели инструментов) являются служебными. Предназначение каждой кнопки проявляется, когда маркер мыши располагается над ней в течение 1-2 секунд (без нажатия кнопок мыши). Очень важными являются следующие кнопки: кнопка с двумя вертикальными чертами «||», которая служит для остановки эксперимента, и рядом расположенные кнопки – для шага «▶|» и для продолжения «▶▶» работы.

В появившемся внутреннем окне компьютерной модели (рис. В4) сверху также расположены служебные кнопки. Кнопка с изображением страницы служит для вызова кратких теоретических сведений из соответствующего раздела курса «Общая физика», которому соответствует компьютерная модель. Перемещать окна можно, зацепив мышью заголовок окна (имеющий синий фон).

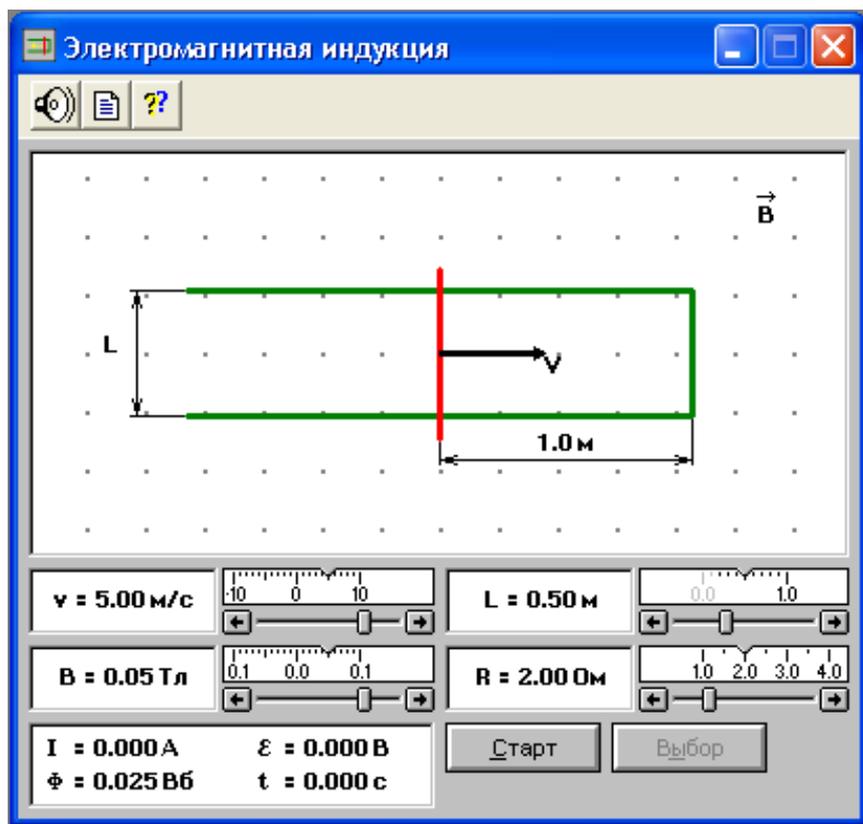


Рис.В4. Окно компьютерной модели «Электромагнитная индукция» в режиме "Выбор".

Перед выполнением расчетно-графической работы внимательно рассмотрите окно модели, найдите все регуляторы и другие элементы, которые позволяют изменять задаваемые параметры величин для виртуального эксперимента.

Например, компьютерная модель «Электромагнитная индукция» (рис.В4) 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. В4) регистрируется величина

магнитного потока Φ , пронизывающего замкнутый контур. Нажатие кнопки "Старт" запускает виртуальный эксперимент, в процессе которого в левом нижнем углу окна модели появляются значения тока I , ЭДС и времени t . По окончании эксперимента магнитный поток равен нулю (рис. В5).

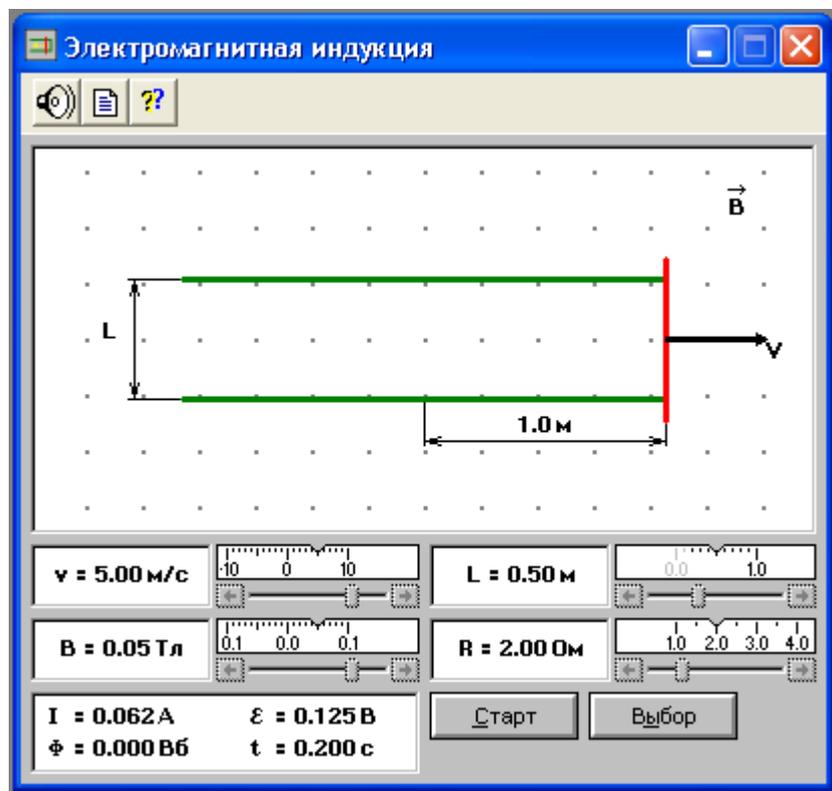


Рис.В5. Окно компьютерной модели «Электромагнитная индукция» в режиме "Старт".

После выполнения расчетно-графической работы необходимо поочередно (начиная с компьютерной модели) закрыть все окна на рабочем столе. Для закрытия окна надо нажать мышью кнопку с крестом в верхнем правом углу данного окна.

Основы теории обработки результатов измерений физических величин

Результаты любых измерений, в том числе физических, как бы тщательно они не выполнялись, подвержены определенным погрешностям. Поэтому при проведении измерений встает задача не только получить значение измеряемой величины, но и оценить погрешность ее определения, а также, в случае необходимости, видеть пути уменьшения этой погрешности.

В данном разделе излагаются основные представления теории погрешностей (ошибок) измерений, знание которых необходимо для грамотного проведения любого эксперимента, в частности, виртуального. Более подробно теория ошибок изложена в литературе, список которой приведен в каждой расчетно-графической работе.

Физика – наука экспериментальная. Физические законы и закономерности рассматриваемых явлений устанавливаются и проверяются опытным путем. Целью физического эксперимента является: 1) определение тех или иных констант - фундаментальных (например, скорости света, заряда электрона, постоянной Планка и т. п.) и материальных (например, плотности вещества, удельного сопротивления, теплоемкости и т. п.) и 2) установление физических зависимостей (например, зависимостей от температуры линейных размеров тела, удельного сопротивления, теплоемкости и т. п.; давления газа от им занимаемого объема, силы тока в проводнике от падения напряжения на нем и т. д.).

Результатом физического эксперимента является, как правило, измерение какой-либо физической величины. *Измерить данную физическую величину означает сравнить ее с величиной того же рода, принятой за единицу, и установить их отношение.*

Процесс измерения осуществляется с помощью того или иного измерительного прибора, у которого величина, принятая за единицу (сантиметр, миллиметр или его доля; грамм, миллиграмм или его доля; ампер или миллиампер и т. д.) устанавливается и проверяется путем сравнения с эталонным прибором.

Прямые и косвенные измерения. В случае прямых измерений значение измеряемой величины непосредственно отсчитывается по шкале прибора (измерение линейных размеров тела микрометром или штангенциркулем; взвешиванием тел на весах и т. п.).

В большинстве случаев производят косвенные измерения, когда измеряемая величина определяется аналитической формулой, в которую входят величины, измеряемые путем прямых измерений. В формулу могут также входить табличные значения, а также точные числа (натуральные,

рациональные и иррациональные числа; величины, известные с очень высокой степенью точности, например, число π).

Так, косвенное измерение сопротивления проволоки можно произвести в соответствии с формулой $R = \rho \frac{l}{\pi \frac{D^2}{4}}$ путем прямых измерений ее длины l и

диаметра D , используя табличное значение удельного сопротивления ρ материала проволоки. Числа π и 4 в формуле являются точными.

Систематические и случайные погрешности измерений. При измерении любой физической величины всегда определяется, как отмечалось, лишь приближенное ее значение, что обусловлено неизбежными для любого эксперимента ошибками.

Погрешности, возникающие при измерениях, делятся на *систематические, случайные и грубые (промахи)*. Поясним различия между ними на примерах. Так, производя взвешивание, принято взвешиваемое тело помещать на левую чашку весов, а разновес – на правую. Поскольку плечи весов невозможно сделать в точности одинаковыми, то разница в длине плеч искажает результаты измерений, завышая или занижая измеряемый вес, причем всегда одинаковым образом. Другой пример – измерение длины тела в условиях, пусть незначительно, но непрерывно изменяющейся (возрастающей или уменьшающейся) температуры, не учитываемых экспериментатором. Погрешности в этих измерениях по указанным причинам относятся к числу систематических.

Систематическими погрешностями называются такие погрешности, которые сохраняют величину и знак от опыта к опыту, или изменяются по определенному закону.

Однако указанные погрешности при взвешивании или измерении длины тела не являются единственными. Качания коромысла весов происходят с трением. Поэтому не только сама измеряемая величина, но и ошибки ее измерения оказываются несколько различными как по величине, так и по знаку. В случае измерения длины тела случайные перекосы тела или разная сила нажима на измерительный инструмент (микрометр или

штангенциркуль) также приводят к немного различающимся результатам. Рассматриваемые погрешности относятся к числу случайных.

Случайные погрешности – это погрешности, величина и знак которых изменяются случайным, непредсказуемым образом от одного измерения к другому, выполняемых одинаковым образом и в одинаковых условиях.

Третий вид погрешностей – *грубые погрешности или промахи*. Их источником является недостаточное внимание выполняющего измерения: неверная запись показаний прибора, неправильное определение цены деления прибора, грубое нарушение методики измерений.

Таким образом, при проведении физических измерений важно не только получить усредненное значение измеряемой величины, но и оценить погрешность ее определения. Измерения должны проводиться таким образом, чтобы погрешности измерений соответствовали поставленной задаче.

Предположим, что нужно измерить ускорение свободного падения g на широте Москвы с относительной точностью 5%. Пусть в ряде измерений каким-либо методом получено усредненное значение $g = 9,8 \text{ м/с}^2$. Ответить на вопрос, хорошо ли (точно ли) проведены измерения, хотя это значение совпадает с табличным, нельзя, пока не будет оценена погрешность этих измерений. Если абсолютная ошибка этих измерений оказалась равной $\Delta g = 3 \text{ м/с}^2$, то это означает, что измеряемая величина g находится где-то в интервале $6,8 \leq g \leq 12,8 \text{ м/с}^2$, что соответствует относительной погрешности $\frac{\Delta g}{g} \cdot 100\% = 30\%$. Такое измерение, очевидно, признать хорошим (точным, в соответствии с поставленной задачей) нельзя. Если же абсолютная ошибка будет равна $\Delta g = 0,3 \text{ м/с}^2$, то есть величина g находится в интервале от 9,5 до 10,1 м/с^2 и $\frac{\Delta g}{g} \cdot 100\% = 3\%$, то следует сделать вывод, что измерения соответствуют поставленной выше задаче.

Не следует требовать от измерений большей точности, чем это необходимо для решения поставленной задачи, так как это ведет, как правило, к неоправданному значительному усложнению эксперимента.

Так, например, при изготовлении доски для книжной полки не требуется точность выше, чем $(0,5 \div 1)$ см, что составляет примерно 1% от длины доски; при изготовлении деталей шарикоподшипников не нужна точность больше, чем 0,001 мм, так как это уже примерно 0,01% от размера детали; при определении положения спектральной линии в ходе спектрального анализа на легирующую добавку конструкционной стали необходимая точность значительно выше 10^{-11} см, что составляет уже около 10^{-5} % от длины волны этой линии, но и большая точность тоже не нужна.

Итак, точность измерений должна соответствовать поставленной задаче. Вместе с тем, следует иметь в виду, что в определенных случаях (например, при научных исследованиях) неоправданное, на первый взгляд, повышение точности измерений может привести к обнаружению нового факта или явления. Так, повышение точности измерения плотности воды, величина которой, казалось бы, была хорошо известна, привело в 1932 г. к открытию дейтерия – тяжелого изотопа водорода, ничтожное содержание которого в обычной воде немного увеличивало ее плотность.

Вычисление погрешностей прямых измерений

В случае прямых измерений значение измеряемой величины a непосредственно отсчитывается по шкале прибора (взвешивание тела на весах; измерение размеров тела микрометром, штангенциркулем или линейкой и т.п.). Обработку результатов прямых измерений можно проводить в следующем порядке:

1) Результаты каждого из n прямых измерений величины a записывают в таблицу экспериментальных данных.

2) Вычисляют среднее арифметическое \bar{a} из n измерений:

$$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i \quad (1)$$

3) Находят ошибки отдельных измерений

$$\Delta a_i = \bar{a} - a_i \quad (2)$$

и вычисляют их квадраты.

4) Вычисляют среднеквадратичную погрешность прямого измерения величины:

$$\sigma_a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta a_i^2}{n(n-1)}}. \quad (3)$$

5) Определяют приборную погрешность измерительного прибора, которая принимается равной половине минимальной цены деления шкалы прибора

$$(\Delta a)_{\text{приб}} = 0,5C_{\text{min}}, \quad (4)$$

где C_{min} – значение одного деления. В случае, если используется электроизмерительный прибор, то его погрешность вычисляется по классу точности и предельному значению шкалы прибора $A_{\text{пр}}$.

$$(\Delta a)_{\text{приб}} = \frac{\text{класс точности}}{100} A_{\text{пр}}. \quad (5)$$

6) Результирующую (абсолютную) погрешность прямого измерения величины a с учетом погрешности прибора находят по формуле:

$$\Delta a = \sigma_a + (\Delta a)_{\text{приб}}. \quad (6)$$

Примечание: если определяемая величина измеряется только один раз, то абсолютная погрешность прямого измерения принимается равной приборной погрешности.

7) Результат расчета измерений величины a записывают в виде:

$$a = \bar{a} \pm \Delta a. \quad (7)$$

8) Для характеристики точности измерений находят относительную погрешность:

$$\delta = \frac{\Delta a}{\bar{a}} 100\% \quad (8)$$

Вычисление погрешностей косвенных измерений

В большинстве случаев, производят косвенные измерения, когда измеряемая величина Z определяется аналитически по формуле:

$$Z = f(a, b, c, \dots), \quad (9)$$

в которую входят величины (a, b, c, \dots) , определяемые путем прямых измерений. В формулу могут также входить табличные значения и точные числа (натуральные, рациональные и иррациональные), величины, известные с очень высокой степенью точности, например, число π .

Обработку результатов косвенных измерений проводят в следующем порядке:

- 1) Результаты прямых измерений величин a, b, c, \dots записывают в таблицу экспериментальных данных.
- 2) Вычисляют средние арифметические значения этих величин

$$\begin{aligned}\bar{a} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i, \\ \bar{b} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n b_i, \\ \bar{c} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i, \dots\end{aligned}\quad (10)$$

- 3) Находят наиболее вероятное значение искомой величины Z , подставляя в формулу (9) значения из расчетов (10)

$$\bar{Z} = f(\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}, \dots). \quad (11)$$

- 4) Вычисляют абсолютные ошибки прямых измерений каждой из величин a, b, c, \dots (см. (1) – (6))

$$\Delta a, \Delta b, \Delta c, \dots \quad (12)$$

- 5) Находят частные производные искомой величины Z при средних значениях $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}, \dots$

$$\begin{aligned}Z'_a &= \left. \frac{df}{da} \right|_{\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}, \dots} \\ Z'_b &= \left. \frac{df}{db} \right|_{\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}, \dots} \\ Z'_c &= \left. \frac{df}{dc} \right|_{\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}, \dots}\end{aligned}\quad (13)$$

- 6) Вычисляют абсолютную погрешность косвенного измерения величины Z по формуле

$$\Delta Z = Z'_a \cdot \Delta a + Z'_b \cdot \Delta b + Z'_c \cdot \Delta c + \dots \quad (14)$$

Результат расчета измерений величины Z записывают в виде

$$Z = \bar{Z} \pm \Delta Z. \quad (15)$$

7) Для характеристики точности измерений находят относительную погрешность

$$\delta = \frac{\Delta Z}{\bar{Z}} 100\%. \quad (16)$$

Графический метод обработки результатов измерений

При обработке результатов эксперимента используют метод определения постоянной величины из графика линейной функции $y = f(x)$ (рис. В6) в случае, если постоянная величина k является коэффициентом пропорциональности, т.е. когда

$$y = kx \quad (17)$$

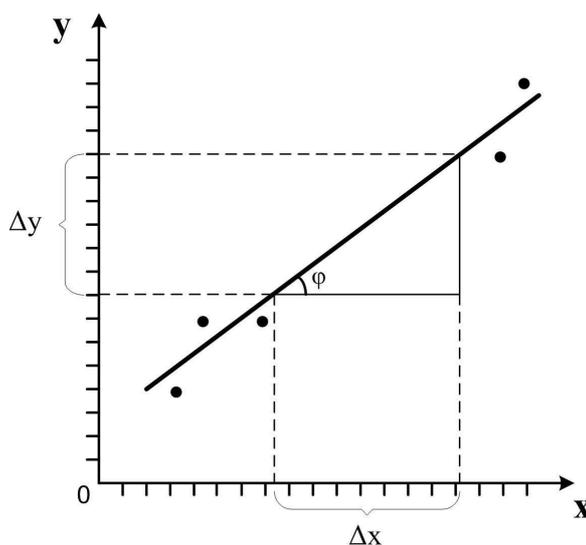


Рис.В6. График линейной функции $y = f(x)$.

Используя экспериментальные данные, отмечают их точками (при однократных измерениях, или отмечают область возможных значение при многократных измерениях) в системе координат YOX и проводят прямую с некоторой достоверностью, если точки не лежат точно по прямой, или прямо по экспериментальным точкам, если они укладываются в прямую. Далее отмечают в средней части этой прямой область, граничные точки которой дают в проекции на оси абсцисс и ординат численные значения интервалов Δx и Δy , по которым вычисляют постоянную величину k по формуле

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (18)$$

где $\frac{\Delta y}{\Delta x}$ - это *отношение приращения функции к соответствующему приращению аргумента*.

Иногда в литературе такой метод определения постоянной величины k излагают как *метод определения постоянной величины по тангенсу угла наклона линейной функции к оси абсцисс*. Действительно, из рис. Вб видно, что отношение $\frac{\Delta y}{\Delta x}$ - это отношение противолежащего катета угла φ к прилежащему катету этого угла, что является тангенсом угла φ , т.е.

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\Delta y}{\Delta x}. \quad (19)$$

При такой методике определения постоянной величины угол φ также необходимо отмечать в средней части прямой линии.

Для примера рассмотрим расчетно-графическую работу 1-1, в которой по экспериментальным данным строят график зависимости напряженности E электрического поля точечного заряда от квадрата обратного расстояния $\frac{1}{d^2}$ до этого заряда. Из графика определяют численное значение электрической

постоянной ε_0 , используя формулу $\varepsilon_0 = \frac{q_1}{4\pi} \frac{\Delta\left(\frac{1}{d^2}\right)}{\Delta(E)}$ (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).

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ТОЧЕЧНЫХ ЗАРЯДОВ

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

Цель работы

Компьютерное моделирование электрического поля точечных зарядов и подтверждение закономерностей для этих полей; определение величины электрической постоянной.

Методика виртуального эксперимента

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

Физическую величину, определяющую способность тел к электромагнитным взаимодействиям, называют *электрическим зарядом*.

Электрический заряд – одна из основных характеристик тел; это скалярная алгебраическая величина, т.е. он может быть положительным и отрицательным. *Электрический заряд, появляющийся на стекле при натирании его шелком, назвали положительным, а заряд, появляющийся на эбоните при натирании шерстью, – отрицательным.* Любой процесс заряжения тел сводится к разделению зарядов, при котором на одном из тел (или части тела) появляется избыток положительного заряда, а на другом (или другой части тела) – избыток отрицательного заряда. Общее количество зарядов обоих знаков, содержащихся в телах, не изменяется, эти заряды только перераспределяются между телами. Обычно обозначают

электрический заряд буквой q или Q . Единица электрического заряда в СИ — кулон (Кл).

Фундаментальные свойства электрических зарядов приведены ниже.

1. Двойственность электрических зарядов. В природе существуют заряды двух знаков. Наименьшим (элементарным) положительным зарядом обладает элементарная частица «протон», входящая в состав ядра атома. Наименьшим (элементарным) отрицательным зарядом обладает элементарная частица «электрон», входящая в состав атома. Элементарный положительный заряд по модулю равен элементарному отрицательному заряду и отличается от него лишь знаком. Модуль элементарного заряда равен $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

2. Аддитивность электрических зарядов. Электрический заряд — аддитивная величина. Это значит, что общий заряд q системы, состоящей из N заряженных частиц, равен сумме зарядов частиц, входящих в эту систему, т.е.

$$q = \sum_{i=1}^N q_i. \quad (1.1)$$

3. Квантование заряда. Опыт показывает, что любой электрический заряд квантуется, т. е. делится целое число раз на элементарные электрические заряды. Поэтому любой заряд q на теле можно представить как произведение целого числа N избыточных или недостающих электронов по сравнению с числом протонов в ядрах атомов этого тела и элементарного заряда e :

$$q = Ne, \quad (1.2)$$

где e — модуль элементарного заряда, $N = 1, 2, 3, \dots$ — число элементарных зарядов в заряде q .

4. Закон сохранения зарядов: в изолированной системе алгебраическая сумма всех зарядов сохраняется при любых изменениях внутри системы. Изолированной называется система, которая не обменивается зарядами с внешней средой.

Взаимодействие неподвижных зарядов называют электростатическим или кулоновским взаимодействием.

Для исследования и описания взаимодействия электрических зарядов вводится понятие точечного заряда, которое, как и понятие материальной точки, является физической абстракцией. **Точечный заряд** – это 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.

$$F = k \frac{|q_1||q_2|}{\epsilon r^2}, \quad (1.3)$$

где F — сила взаимодействия точечных зарядов, q_1 и q_2 - модули зарядов, ϵ — 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 (1.4) численного значения **величины** ϵ_0 , которая называется **электрической постоянной**, равного $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл/Н} \cdot \text{м}^2$,

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}. \quad (1.4)$$

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 (рис. 1.1).

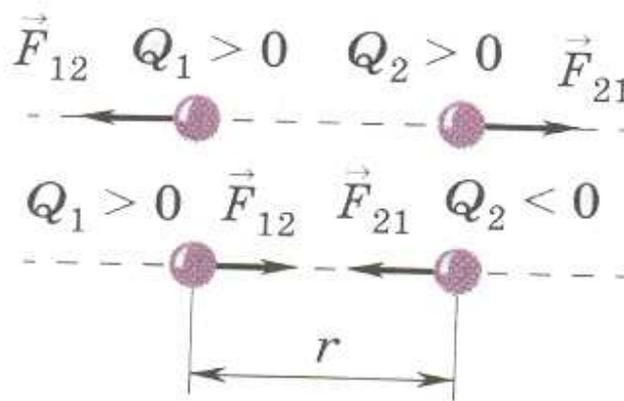


Рис 1.1. Направление кулоновских сил взаимодействия двух точечных зарядов

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.

Если на заряд действуют силы со стороны нескольких зарядов, то их равнодействующая определяется по правилу векторного сложения сил. Это правило называется принципом суперпозиции сил. **Принцип суперпозиции сил при взаимодействии нескольких зарядов:** равнодействующая сил, действующих на данный заряд со стороны других зарядов, равна векторной сумме сил, действующих на этот заряд со стороны каждого заряда в отдельности. Из принципа суперпозиции сил следует, что сила взаимодействия двух зарядов не изменится, если между ними поместить другие заряды.

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).

Для опытного исследования электростатического поля используют **пробный точечный положительный заряд Q_0** — это заряд, который вносят в поле заряда-источника и с помощью которого исследуют это поле. Пробный заряд должен быть расположен на теле столь малых размеров, чтобы его можно было поместить в данную точку поля. При этом

собственное электрическое поле пробного заряда должно быть столь мало, чтобы оно не изменяло поле заряда источника. Понятно, что таких пробных зарядов в природе не существует, поэтому пробный заряд относится к абстрактным объектам. Чем меньше размеры заряженного тела, несущего заряд, которым исследуют электрическое поле, и чем слабее его собственное поле по сравнению с полем заряда-источника, тем точнее заряд на теле удовлетворяет условию пробного заряда.

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

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

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q_0}. \quad (1.5)$$

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.

На рис. 1.2 изображены два случая источника электрического поля - положительный заряд-источник и отрицательный заряд-источник, в поле которого располагается точка А. Если в эту точку внести пробный (положительный) заряд, то на него со стороны заряда-источника поля будет действовать сила \vec{F} . Поскольку условились считать вектор напряженности \vec{E} сонаправленным с вектором силы \vec{F} , действующей на положительный (пробный) заряд, значит, вектор \vec{E} направлен в точке А так же. В случае отрицательного заряда-источника, если в точку А внести пробный (положительный) заряд, то сила \vec{F} , действующая на него, «повернется» к

заряду-источнику и так же будет направлен вектор \vec{E} . Если пробный заряд, убрать из точки А, то поле в этой точке все равно останется и оно будет иметь показанное направление.

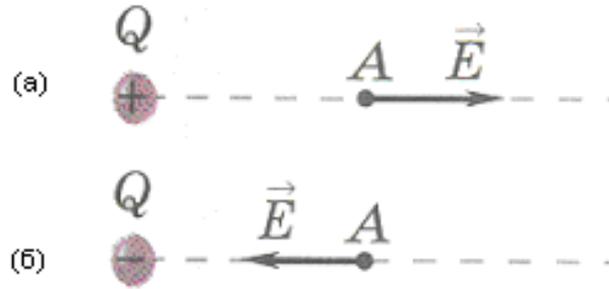


Рис. 1.2 Направление вектора напряженности электрического поля, создаваемого положительным (а) и отрицательным (б) зарядами.

Из вышеизложенного следует вывод: *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 (где $\epsilon=1$) вычисляется по формуле

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}, \quad (1.6)$$

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.*

Если электрическое поле создано несколькими зарядами-источниками, то результирующая напряженность этого поля определяется **принципом суперпозиции полей**: *напряженность электрического поля \vec{E} , созданного в данной точке несколькими зарядами-источниками, равна векторной сумме напряженностей полей \vec{E}_i , созданных в этой точке каждым зарядом в отдельности:*

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^N \vec{E}_i. \quad (1.7)$$

На рис. 1.3 показан пример, когда поле создается двумя одинаковыми точечными положительными неподвижными зарядами Q_1 и Q_2 (здесь они выбраны равными $Q_1=Q_2$). В этом случае напряженность электростатического поля в каждой точке пространства равна векторной сумме напряженностей полей, создаваемых зарядами Q_1 и Q_2 (на рис.1.3 точка А равноудалена от зарядов, а точка В выбрана произвольно).

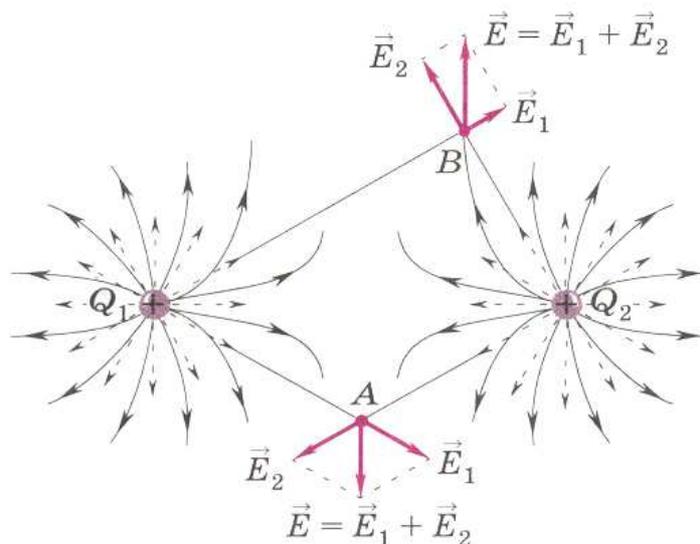


Рис . 1.3 Принцип суперпозиции электрических полей.

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

$$\vec{F} = q\vec{E}, \quad (1.8)$$

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

$$\varphi = \frac{W_n}{q_{np}} \quad (1.9)$$

Потенциал поля точечного заряда в вакууме вычисляется по формуле

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}, \quad (1.10)$$

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» (рис. 1.4). 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 φ появляются в окне модели при исследовании электрического поля. Для этого необходимо установить указатель мыши (здесь он имеет вид руки) в выбранную точку поля, нажать левую кнопку мыши; ***при нажатой кнопке мыши на экране фиксируются численные значения напряженности E и потенциала φ в исследуемой точке электрического поля.***

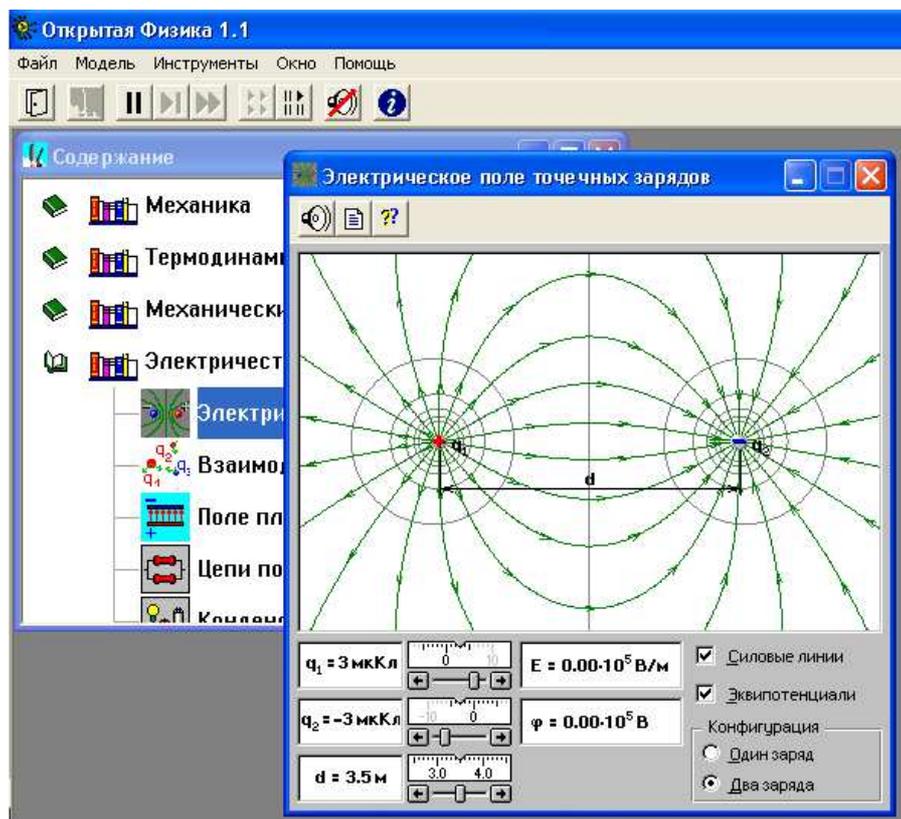


Рис. 1.4. Диалоговое окно компьютерной модели «Электрическое поле точечных зарядов» при конфигурации "Два заряда".

Откройте компьютерную модель «Взаимодействие электрических зарядов» (рис. 1.5). 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 (значения которых выводятся в левом нижнем углу окна модели), но и менять расстояние между зарядами с помощью мыши, "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).

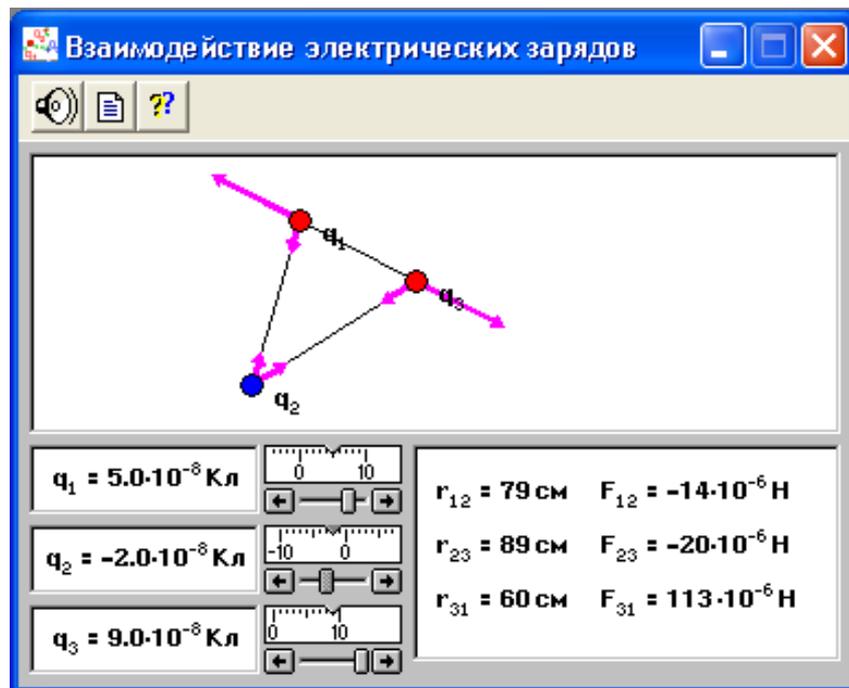


Рис. 1.5. Окно компьютерной модели «Взаимодействие электрических зарядов».

При использовании этой компьютерной модели в виртуальном эксперименте 3, устанавливают значение заряда $q_3 = 0$ 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

$$E = \frac{F_{12}}{q_2}, \quad (1.11)$$

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_2 установите равной 0 (в этом эксперименте заряд q_2 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.1.1 для вашего варианта.

Таблица 1.1

**Значения 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. 1.2.

Таблица 1.2

Результаты измерений напряженности и потенциала

d , м	2	2,5	3	3,5	4
E , В/м					
φ , В					

5. Подведя указатель мыши к месту расположения заряда q_2 , разместите его примерно на 1 мм ниже заряда q_2 вдоль нарисованной вертикальной линии, нажмите левую кнопку мыши и запишите численные значения напряженности E и потенциала φ в табл. 1.2.

6. Повторите измерения напряженности E и потенциала φ электрического поля (пункты 4 и 5) для других значений расстояния d из табл. 1.1.

Эксперимент 2

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

2. Значение заряда q_2 установите равной 0 (в этом эксперименте заряд q_2 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 1.3 для вашего варианта.

Таблица 1.3

**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 , указанное в табл.1.4 первым

Таблица 1.4

Результаты измерений напряженности и потенциала

q_1 , мкКл	1	2	3	4	5
E , В/м					
φ , В					

5. Подведя указатель мыши (руку) к месту расположения заряда q_2 , установите его примерно на 1 мм ниже заряда, нажмите левую кнопку мыши и запишите численные значения напряженности E и потенциала φ в табл.1.4.

6. Повторите измерения напряженности E и потенциала φ электрического поля (пункты 4 и 5) для других значений заряда q_1 из табл.1.4.

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. 1.5 для вашего варианта.

Таблица 1.5

Значения 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

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

6. 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. 1.6 первым и запишите в табл. 1.6 значение измеренной силы F_{12} .

Таблица 1.6

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

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

7. Повторите измерения п.6 для других значений расстояния r_{12} , заполняя третью строку табл. 1.6.

8. Установите величину заряда $q_{1(2)}$, указанную в табл. 1.5 для вашего варианта.

9. Повторите измерения п.6 и п.7 для $q_{1(2)}$, заполняя третью строку табл.1.7.

Таблица 1.7

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

$r_{12}, \text{ м}$	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 φ 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 ϵ_0 , используя формулы $\epsilon_0 = \frac{q_1}{4\pi} \frac{\Delta\left(\frac{1}{d^2}\right)}{\Delta(E)}$ (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 $\epsilon_0 = \frac{q_1}{4\pi} \frac{\Delta\left(\frac{1}{d}\right)}{\Delta(\varphi)}$ (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 φ от величины заряда q_1 .

2. Определите (для каждого графика) численное значение электрической постоянной ϵ_0 , используя формулы $\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi d^2} \frac{\Delta(q_1)}{\Delta(E)}$ (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 $\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi d} \frac{\Delta(q_1)}{\Delta(\varphi)}$ (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 1.6 и 1.7 значения для второй строки.

2. Используя формулу (1.11), вычислите величину напряженности электрического поля E_i в исследуемой точке, подставив в неё значение измеренной силы F_{12} и заряда q_2 , и занесите в соответствующую строку таблиц 1.6 и 1.7.

3. Постройте на одном листе графики зависимости напряженности электрического поля E_i точечного заряда q_{1i} 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

Калашников С.Г. Электричество. Физматлит, 2006.

Сивухин Д.В. Общий курс физики. В 5т.М.: 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, входящих в него.
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.

Расчетно-графическая работа № 1 – 2

ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

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

Цель работы

Компьютерное моделирование цепей постоянного тока и подтверждение закона Ома.

Методика виртуального эксперимента

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

$$I = \frac{U}{R}, \quad (2.1)$$

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

Электрический ток — любое упорядоченное (направленное) движение электрических зарядов. **Током проводимости** называют упорядоченное движение свободных электрических зарядов в проводнике, например, ток в металлах, электролитах, газах.

Для возникновения и существования электрического тока необходимы свободные заряды — носители тока (заряженные частицы, способные упорядоченно перемещаться), а также наличие электрического поля, энергия которого, каким-то образом восполняясь, расходовалась бы на поддержание упорядоченного движения носителей тока.

Электрический ток, характеристики которого со временем не изменяются, называют постоянным током. Условно за направление электрического тока считают направление движения положительных зарядов: направление тока совпадает с направлением напряженности электрического поля, обусловившего этот ток.

Количественной характеристикой электрического тока является **сила тока I** — скалярная физическая величина, определяемая электрическим зарядом, проходящим через поперечное сечение проводника в единицу времени:

$$I = \frac{dq}{dt}. \quad (2.2)$$

Для постоянного тока сила тока равна

$$I = \frac{q}{t}. \quad (2.3)$$

Единица силы тока в СИ — ампер (А).

Электродвижущая сила и напряжение. Если на носители тока в цепи действуют силы электростатического поля, то под действием этих сил положительные носители тока перемещаются от точек цепи с большим потенциалом к точкам цепи с меньшим потенциалом. В результате этого потенциалы во всех точках цепи выравниваются, что приводит к исчезновению электрического поля, следовательно, и к исчезновению тока.

Чтобы поддерживать в цепи постоянную разность потенциалов, а тем самым и электрический ток, необходимо «перекачивать» носители тока в обратную электростатическому полю сторону. Это возможно только за счет работы сил не электростатического происхождения, которые называют **сторонними силами**. Устройства, способные создавать и поддерживать разность потенциалов в цепи за счет работы сторонних сил, называют **источниками тока**.

Участок электрической цепи, в котором на носители тока действуют только кулоновские силы (силы электростатического поля), называют **однородным**, а участок, на котором помимо кулоновских сил действуют еще и сторонние силы, — **неоднородным**.

Сторонние силы совершают работу по перемещению электрических зарядов. Физическую величину, определяемую работой, которую совершают сторонние силы при перемещении единичного положительного заряда вдоль всей цепи, называют **электродвижущей силой (э.д.с.) источника тока**:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{ст}}{q_0}. \quad (2.4)$$

где $A_{ст}$ — работа сторонних сил, q_0 —единичный положительный заряд.

В СИ единица э.д.с. такая же, как и единица потенциала электростатического поля, т.е. вольт (В).

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

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}, \quad (2.5)$$

где \mathcal{E} – э.д.с. (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 (от англ. — *resistor*). Для измерения силы тока амперметр (А) подключают к проводнику последовательно, для измерения напряжения вольтметр (V) подключают к проводнику параллельно. Условное обозначение резистора приведено на рисунке 2.1, на котором также изображена схема подключения амперметра А (последовательно) и вольтметра V (параллельно) резистору, на концах которого измеряют разность потенциалов.

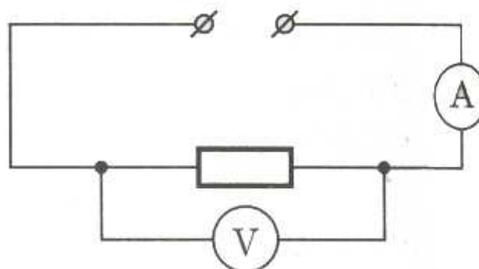


Рис. 2.1. Схема подключения амперметра (А) и вольтметра (V) к электросопротивлению (нагрузке).

Резисторы в электрических цепях постоянного тока можно соединять последовательно и параллельно.

Последовательное соединение проводников. В случае последовательного соединения проводников конец первого проводника соединяют с началом второго и т.д. (рис. 2.2).

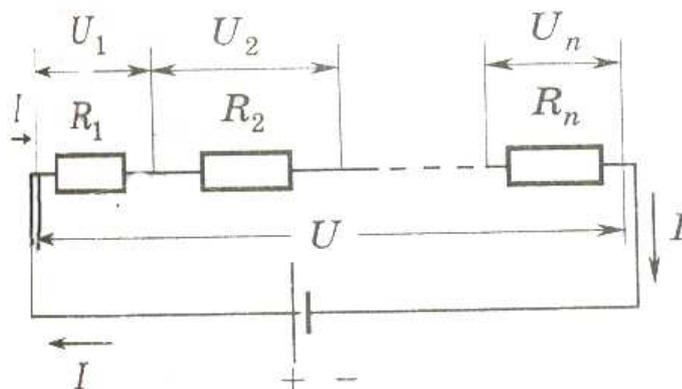


Рис.2.2. Схема последовательного соединения проводников.

При последовательном соединении n проводников:

- сила тока I одинакова во всех резисторах

$$I = I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_n \quad (2.6)$$

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

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n \quad (2.7)$$

- общее сопротивление последовательно соединенных резисторов R равно их сумме

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \quad (2.8)$$

Параллельное соединение проводников. В случае параллельного соединения проводников их начала и концы имеют общие точки подключения к источнику тока (рис. 2.3.)

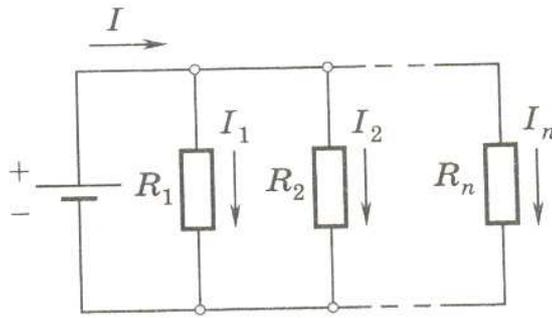


Рис.2.3. Схема параллельного соединения проводников.

При параллельном соединении n проводников:

- напряжение U одинаково на всех резисторах

$$U_1 = U_2 = U_3 = \dots = U_n \quad (2.9)$$

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

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n \quad (2.10)$$

- общее сопротивление R при параллельном соединении проводников вычисляют по формуле:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (2.11)$$

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.2.4).

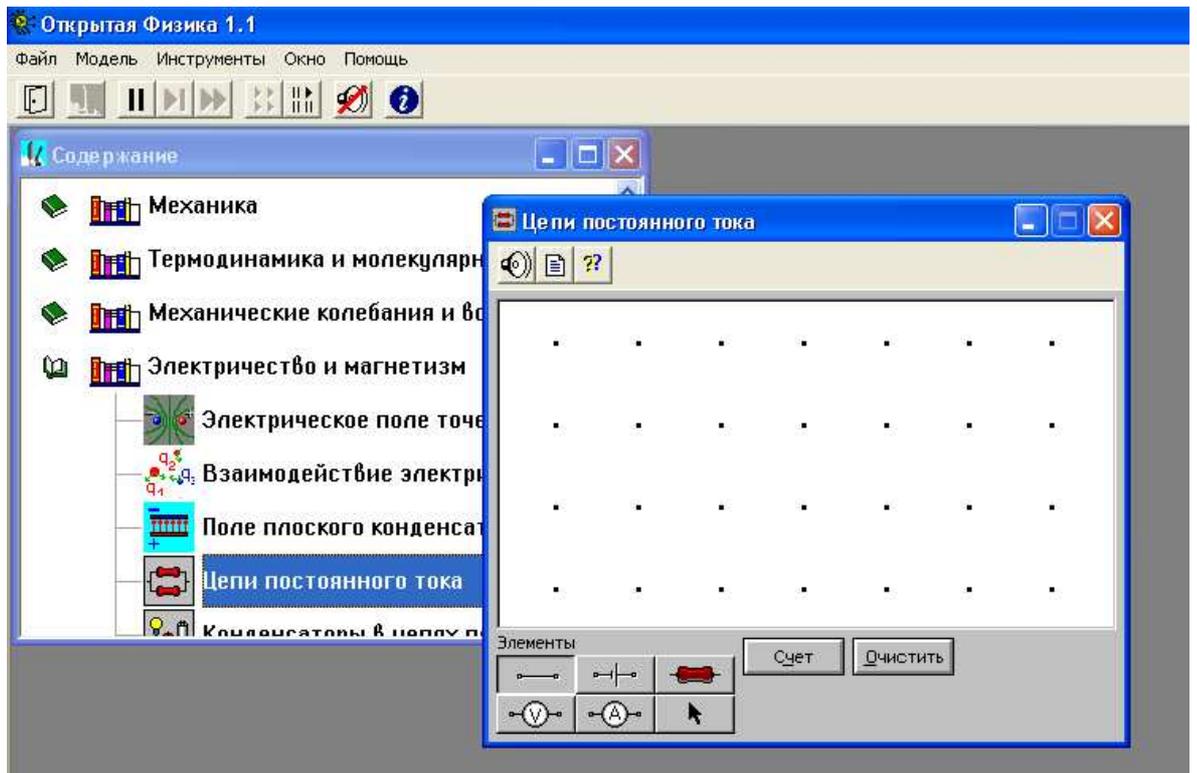


Рис. 2.4. Диалоговое окно компьютерной модели «Цепи постоянного тока».

Соберите на чистом экране компьютерной модели простейшую электрическую цепь. Для примера соберите цепь, изображенную на рис. 2.5.

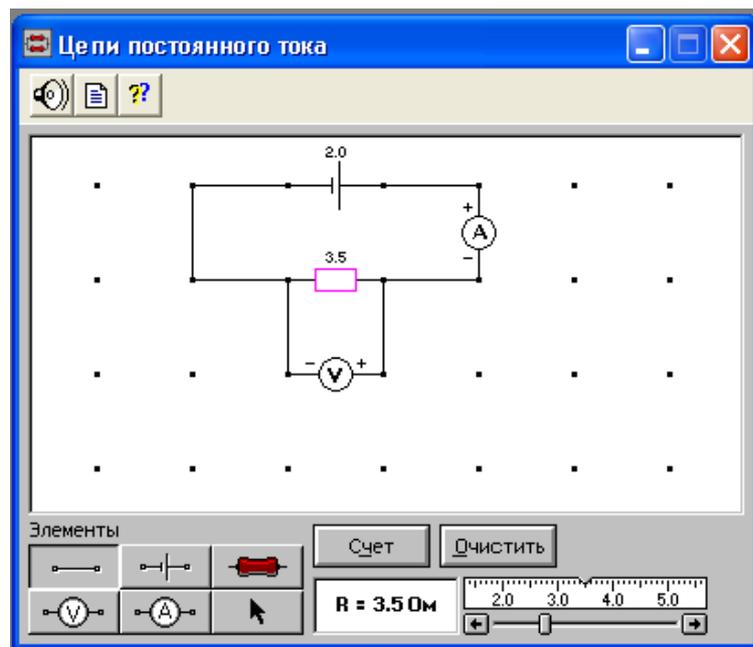


Рис. 2.5. Окно компьютерной модели «Цепи постоянного тока» в режиме сборки цепи и установки значений э.д.с. \mathcal{E} и сопротивлений R .

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 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.2.5 в режиме сборки цепи и установки значений необходимых параметров.

В окне компьютерной модели есть две кнопки: «Счет» и «Очистить». При нажатии на кнопку «Очистить» рабочее поле окна компьютерной модели очищается. **Нажатие на кнопку «Счет» позволяет снять показания измерительных элементов электрической цепи – амперметра и вольтметра.** Например, собранная ранее схема (рис.2.5) после нажатия кнопки «Счет» показывает значения тока 0.57А и напряжения 2.00 В (рис.2.6).

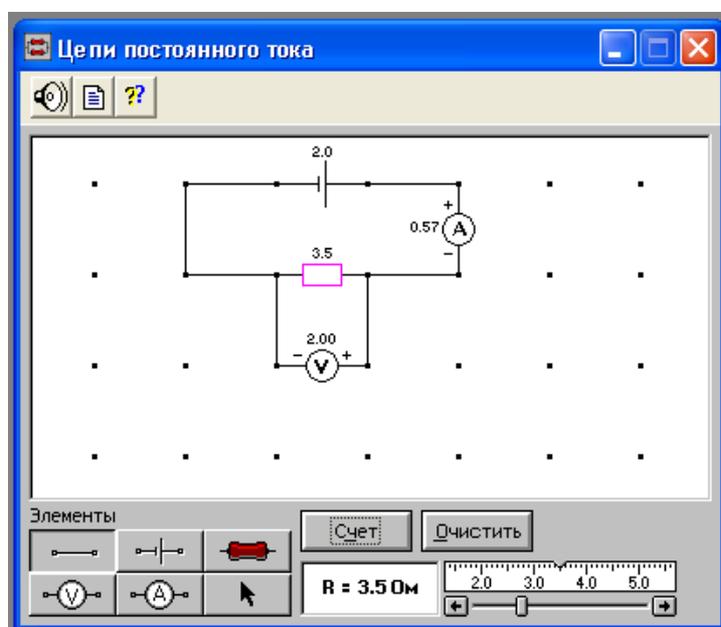


Рис. 2.6. Компьютерная модель «Цепи постоянного тока» в режиме «Счет».

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 указатель 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 указатель 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: дважды щелкнуть левой кнопкой мыши по кнопке с обозначением элемента, далее - по кнопке с обозначением стрелочки, затем - по элементу в схеме компьютерной модели.

Порядок выполнения работы

Эксперимент 1

1. Перерисуйте в конспект схему, номер которой соответствует номеру вашего варианта (рис. 2.7 – 2.16), с указанием численных значений всех элементов.

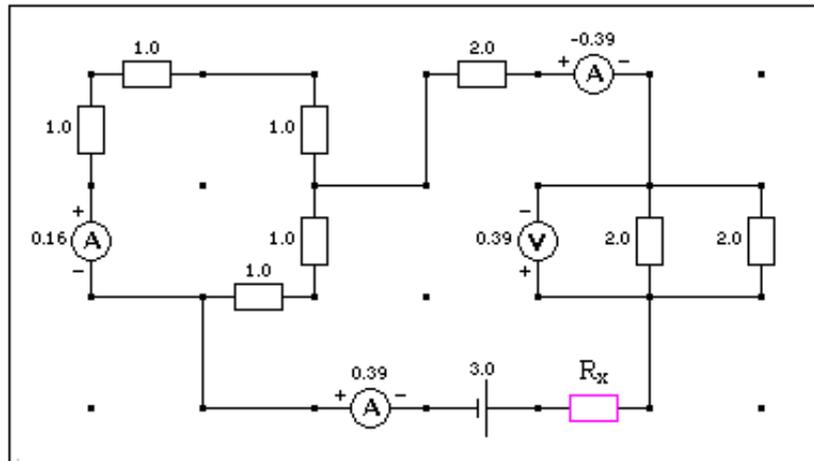


Рис.2.7. Схема № 1 (вариант 1).

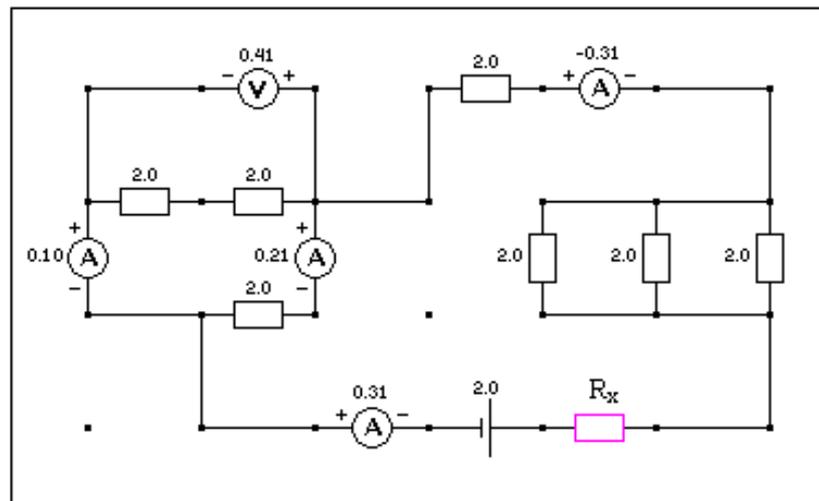


Рис.2.8. Схема № 2 (вариант 2).

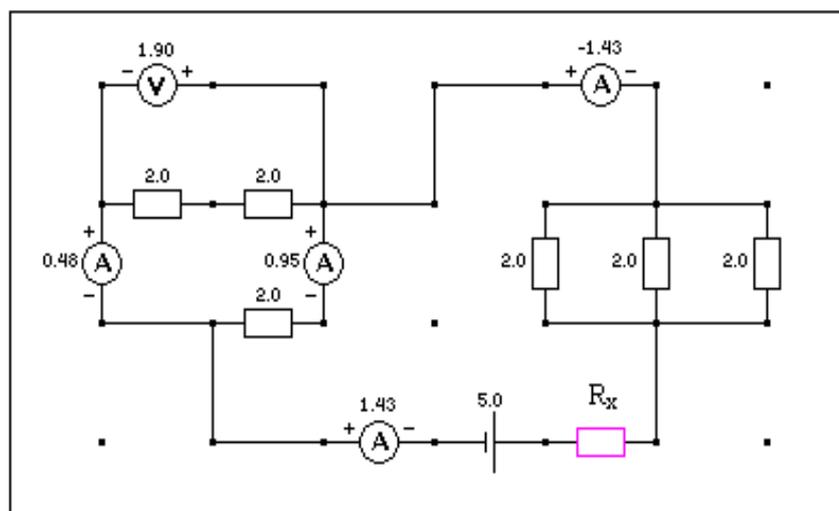


Рис.2.9. Схема № 3 (вариант 3).

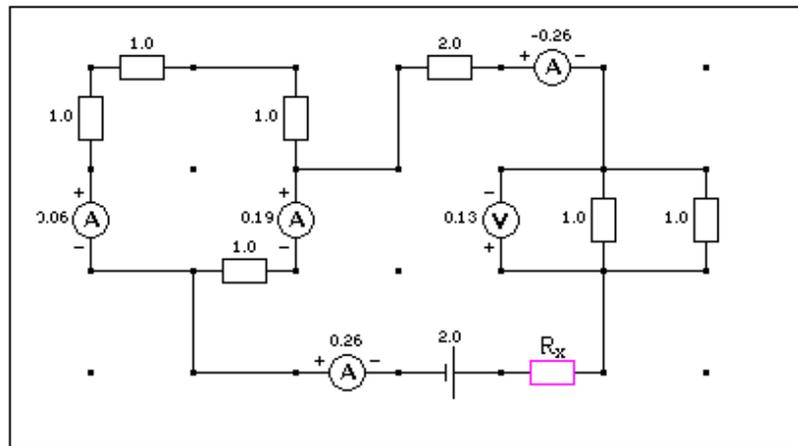


Рис.2.10. Схема № 4 (вариант 4).

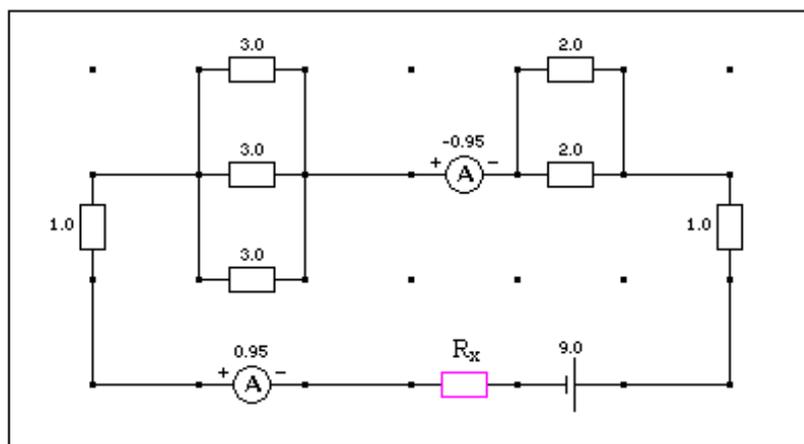


Рис.2.11. Схема № 5 (вариант 5).

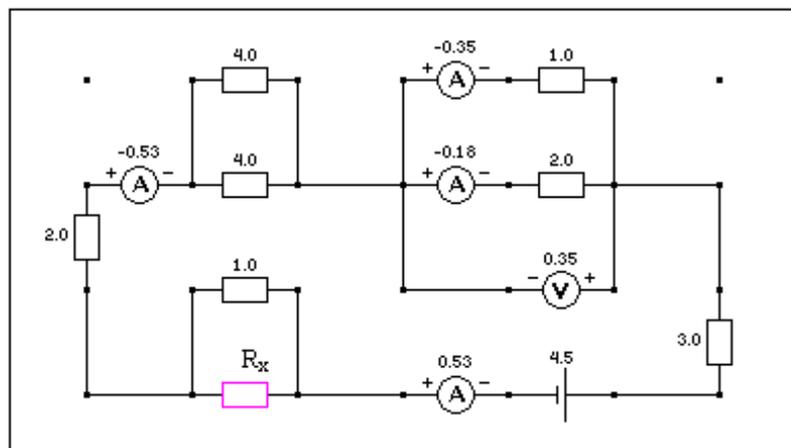


Рис. 2.12. Схема № 6 (вариант 6).

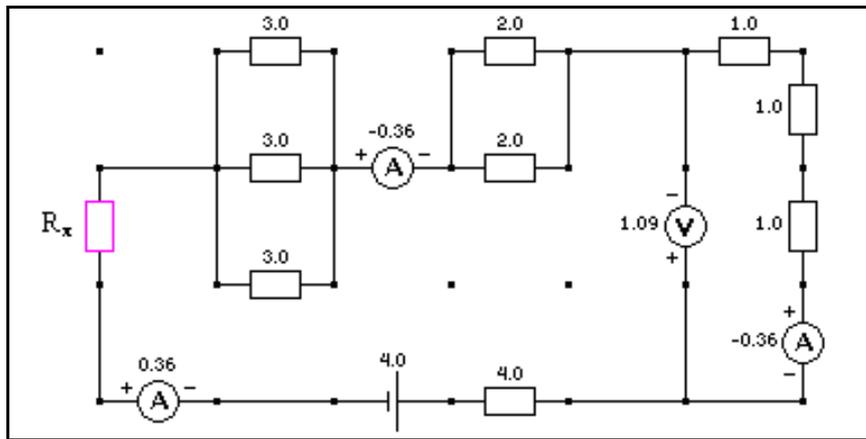


Рис. 2.13. Схема № 7 (вариант 7).

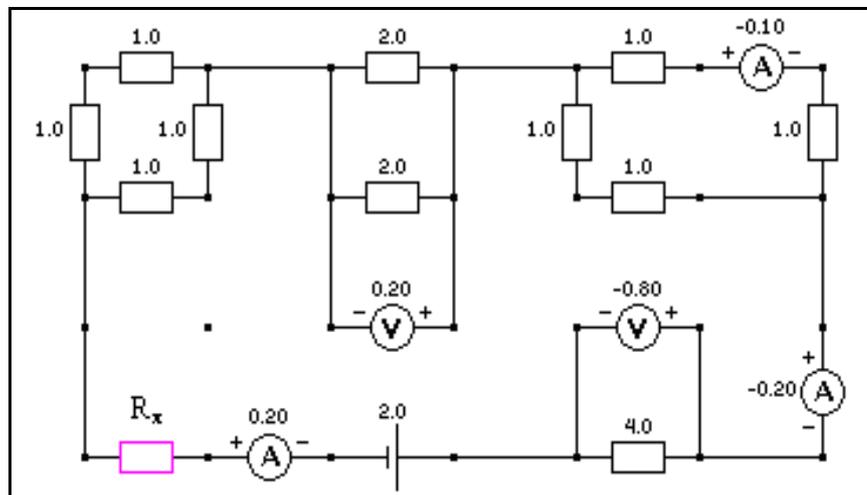


Рис. 2.14. Схема № 8 (вариант 8).

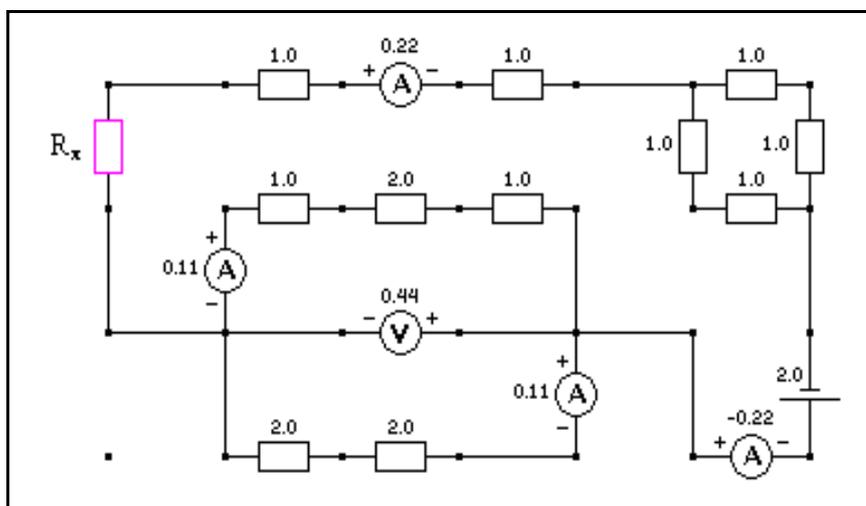


Рис. 2.15. Схема №9 (вариант 9).

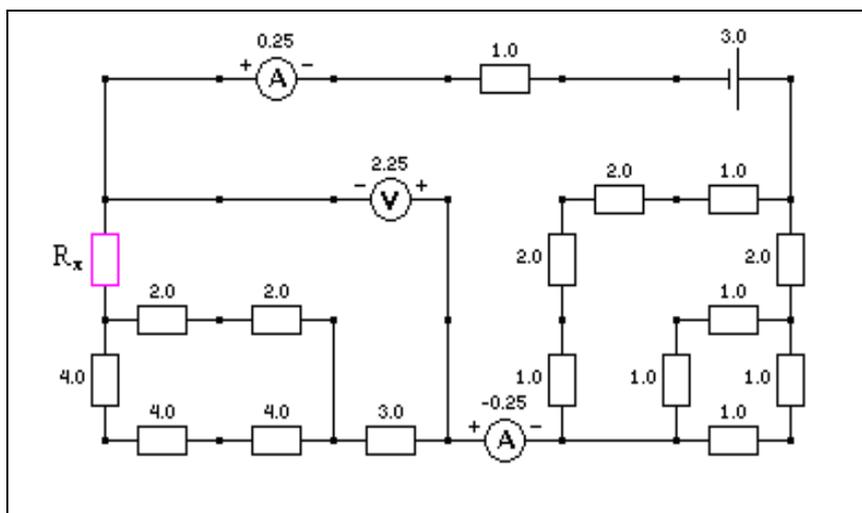


Рис. 2.16. Схема №10 (вариант 10).

2. Используя формулы для 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 работе.

3. Откройте компьютерную модель "Цепи постоянного тока" (при открытии экран модели чист как на рис. 2.4).

4. Соберите схему, соответствующую номеру вашего варианта, устанавливая соответствующие значения источника тока и всех сопротивлений (включая вычисленное вами значение R_x).

5. Нажмите кнопку "Счет".

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

Эксперимент 2

1. Перерисуйте в конспект схему №11 (рис.2.17). При подготовке к работе обратите внимание, какие приборы регистрируют значение величины силы тока и напряжения на сопротивлении R_i .

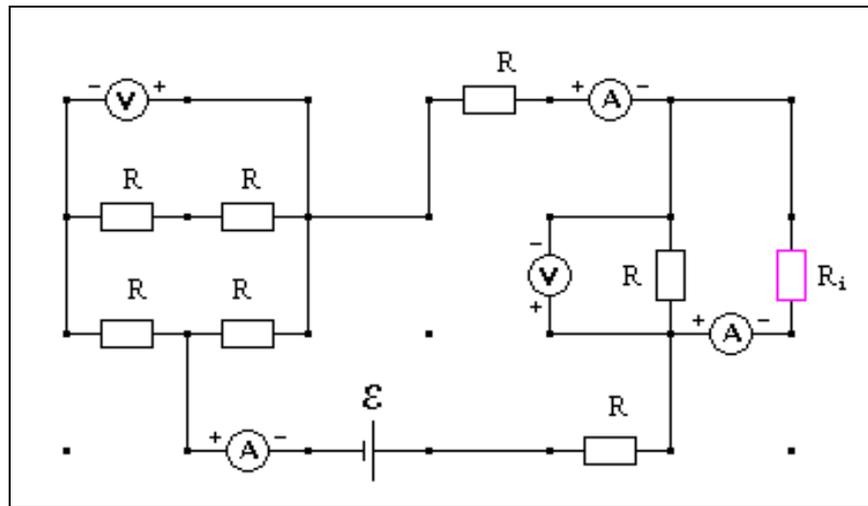


Рис. 2.17. Схема №11.

2. Получив у преподавателя допуск к выполнению работы, откройте компьютерную модель «Цепи постоянного тока» (при открытии экран модели чист как на рис. 2.4).

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

4. Установите значение сопротивления $R_i = R_1$, указанное в табл. 2.1 для вашего варианта.

Таблица 2.1

Значения сопротивления R_i (не перерисовывать).

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

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 табл. 2.2

Таблица 2.2

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

E , В	0	2	4	6	8	10
U , В						
I , А						

6. Повторите действия п. 5. для других значений сопротивления R_i из табл. 2.1 для вашего варианта.

7. Запишите результаты измерений в таблицы, составленные аналогично табл. 2.2, 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. 2.17).

2. Постройте на одном листе вольт-амперные 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. 2007.

Дополнительный

Калашиников С.Г. Электричество. М.: Физматлит, 2006.

Сивухин Д.В. Общий курс физики. М.: Физматлит, 2002. 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.

Расчетно-графическая работа № 1 – 3

ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

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

Цель работы

Компьютерное моделирование цепей постоянного тока и 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 э.д.с., действующей в цепи, и обратно пропорциональна сумме электрических сопротивлений внешнего и внутреннего участков цепи:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}, \quad (3.1)$$

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

Электрический ток, характеристики которого со временем не изменяются, называют **постоянным током**. Условно за направление электрического тока считают направление движения положительных зарядов: направление тока совпадает с направлением напряженности электрического поля, обусловившего этот ток.

Количественной характеристикой электрического тока является **сила тока I** — скалярная (физическая) величина, определяемая электрическим зарядом, проходящим через поперечное сечение проводника в единицу времени:

$$I = \frac{q}{t}. \quad (3.2)$$

В СИ силу тока измеряют в амперах (А).

Электродвижущая сила и напряжение. Если на носители тока в цепи действуют силы электростатического поля, то под действием этих сил положительные носители тока перемещаются от точек цепи с большим потенциалом к точкам цепи с меньшим потенциалом. В результате этого потенциалы во всех точках цепи выравниваются, что приводит к исчезновению электрического поля, следовательно, и к исчезновению тока.

Чтобы поддерживать в цепи постоянную разность потенциалов, а тем самым и электрический ток, необходимо «перекачивать» носители тока в обратную электростатическому полю сторону. Это возможно только за счет работы сил не электростатического происхождения, которые называют *сторонними силами*. Устройства, способные создавать и поддерживать разность потенциалов в цепи за счет работы сторонних сил, называют *источниками тока*.

Участок электрической цепи, в котором на носители тока действуют только кулоновские силы (силы электростатического поля), называют *однородным*, а участок, на котором помимо кулоновских сил действуют еще и сторонние силы, — *неоднородным*.

Рассмотрим цепь постоянного тока, включающую проводник и источник тока (его условное обозначение приведено на рис. 3.1), например, гальванический элемент.

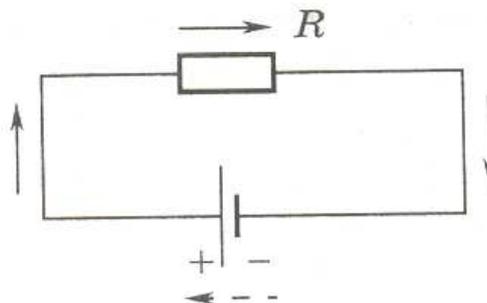


Рис. 3.1. Пример замкнутой электрической цепи (контур).

Под действием поля сторонних сил положительные заряды внутри источника тока движутся против сил электростатического поля (на рис. 3.1 это указано пунктирной стрелкой) и собираются вблизи положительного полюса, а отрицательные заряды собираются у противоположного — отрицательного полюса, поэтому на концах цепи за счет работы сторонних сил будет поддерживаться постоянная разность потенциалов.

После замыкания цепи на внутреннем и внешнем участках цепи свободные заряды придут в упорядоченное движение, в цепи потечет электрический ток. На внешнем участке цепи носители тока движутся под действием сил электростатического поля (на рис. 3.1 это указано сплошной стрелкой) по направлению вектора напряженности \vec{E} , во внутреннем — под действием сторонних сил (против вектора) \vec{E} . Таким образом, на внешнем участке цепи ток направлен от положительного полюса к отрицательному полюсу, а внутри источника тока — от отрицательного к положительному полюсу.

Сторонние силы совершают работу по перемещению электрических зарядов. *Физическую величину, определяемую работой, которую совершают сторонние силы при перемещении единичного положительного заряда вдоль всей цепи, называют электродвижущей силой (э.д.с.) \mathcal{E} источника тока.*

В СИ э.д.с. измеряют в тех же единицах, что и потенциал электростатического поля, т.е. в вольтах (В).

Напряжение на участке электрической цепи 1—2 (см. рис.3.2) — это физическая величина, определяемая работой, которую совершает суммарное поле электростатических (кулоновских) и сторонних сил при перемещении единичного положительного заряда на данном участке цепи:

$$U_{12} = \frac{A_{12} + A_{ст}}{q_0}. \quad (3.3)$$

где A_{12} - работа сил электростатического поля при перемещении заряда q_0 из точки 1 в точку 2, $A_{ст}$ - работа сторонних сил.

$$A_{12} = q_0 (\varphi_1 - \varphi_2) \quad (3.4)$$

Напряжение на участке цепи 1—2, содержащем источник тока, равно сумме э.д.с. источника и разности потенциалов на этом участке:

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}. \quad (3.5)$$

Закон Ома для однородного участка цепи: сила тока на однородном участке цепи (в проводнике) прямо пропорциональна разности потенциалов на концах участка цепи и обратно пропорциональна сопротивлению этого участка:

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R}. \quad (3.6)$$

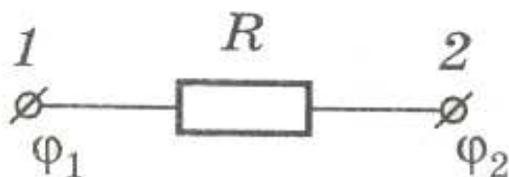


Рис. 3.2. Пример однородного участка электрической цепи.

В СИ сопротивление измеряют в омах (Ом).

Закон Ома для неоднородного участка цепи: сила тока на неоднородном участке цепи прямо пропорциональна напряжению на концах участка и обратно пропорциональна его сопротивлению:

$$I = \frac{U}{R}. \quad (3.7)$$

С учетом формулы (3.5), закон Ома для неоднородного участка цепи (рис.3.3) можно записать в следующем виде:

$$I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}_{12}}{R}, \quad (3.8)$$

где \mathcal{E}_{12} — э.д.с., действующая на участке 1—2; $(\varphi_1 - \varphi_2)$ — разность потенциалов, приложенная на концах этого участка электрической цепи.

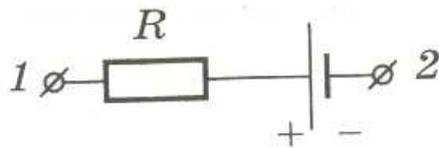


Рис.3.3. Пример неоднородного участка электрической цепи.

Суммарная работа, совершаемая электростатическими силами при перемещении электрического заряда по замкнутой траектории, равна нулю. Следовательно, **в замкнутой электрической цепи разность потенциалов равна нулю**, и ток в замкнутой цепи вычисляют по формуле (3.1).

Электрические цепи часто содержат несколько замкнутых контуров. Контур могут иметь общие участки, в каждом из которых может быть включено по несколько источников тока. 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:

$$\sum_k I_k = 0 \quad (3.9)$$

Любую точку разветвления цепи, в которой сходится более трех проводников с током, называют **узлом** (рис. 3.4).

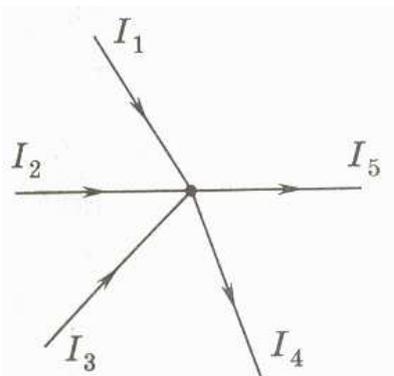


Рис. 3.4. Узел электрической цепи.

Токи, входящие в узел, условились считать положительными, а токи, выходящие из узла, считают отрицательными. С учетом этого, для узла на рис. 3.4, можно записать первое правило Кирхофа

$$I_1 + I_2 + I_3 - I_4 - I_5 = 0 \quad (3.10)$$

Первое правило Кирхгофа является следствием закона сохранения заряда: заряды в цепи не создаются и не уничтожаются, поэтому сколько их к данному узлу за данный промежуток времени подходит, столько же должно и уходить.

Второе правило Кирхгофа: для любого замкнутого контура, выделенного внутри разветвленной цепи, алгебраическая сумма падений напряжений на сопротивлениях $I_k R_k$ равна алгебраической сумме э.д.с. \mathcal{E}_n , действующих в этом контуре:

$$\sum_k I_k R_k = \sum_n \mathcal{E}_n \quad (3.8)$$

При расчете сложных цепей постоянного тока с применением правил Кирхгофа необходимо:

1) Выбрать произвольное направление токов на всех участках цепи (действительное направление токов определяется при решении задачи: если искомый ток получится положительным, то его направление было выбрано правильно, отрицательным — его истинное направление противоположно избранному).

2) Выбрать направление обхода контура и строго его придерживаться.

3) Составить столько уравнений, чтобы их число было равно числу искомых величин (в систему уравнений должны входить все сопротивления и э.д.с. рассматриваемой цепи); каждый рассматриваемый контур должен содержать хотя бы один элемент, не содержащийся в предыдущих контурах, иначе получатся уравнения, являющиеся простой комбинацией уже составленных.

При расчетах следует использовать следующие правила:

правило обхода: э.д.с. источников тока считают положительными, если они создают ток, направленный в сторону обхода контура;

правило знаков: все токи, которые совпадают с направлением обхода, считают положительными, не совпадающие — отрицательными.

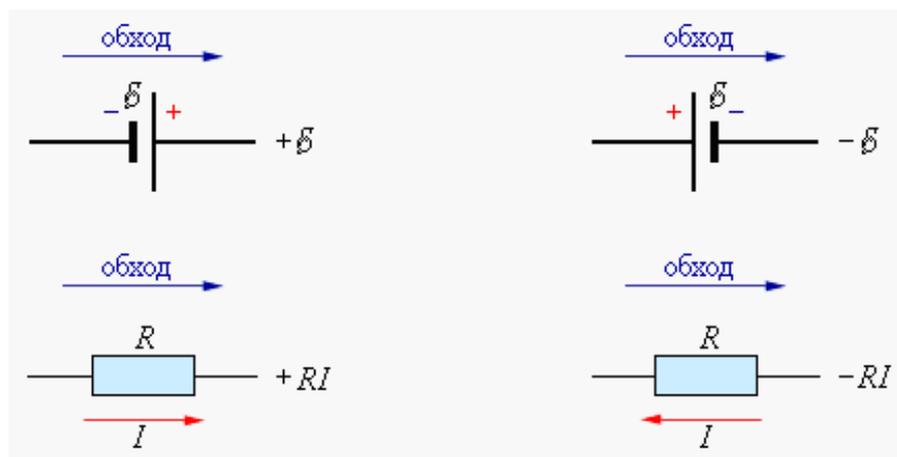


Рис. 3.5. Применение правил обхода и знаков.

Для примера рассмотрим разветвленную цепь, изображенную на рис.3.6.

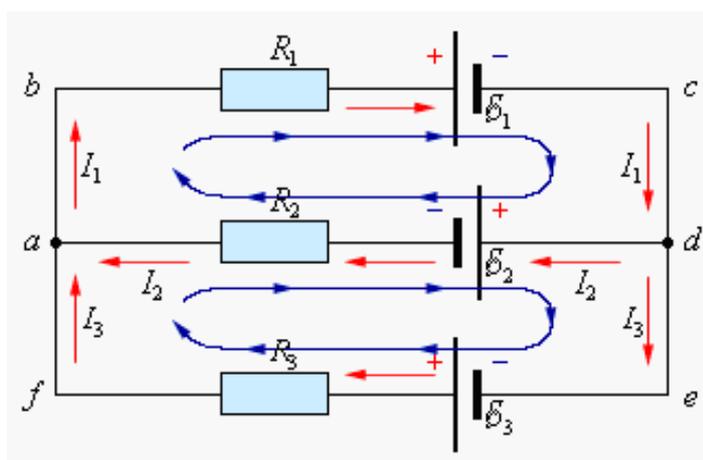


Рис.3.6.Пример сложных цепей постоянного тока.

Применяя правила Кирхгофа и правила обхода, составим систему уравнений:

для узла a : 1) $I_2 + I_3 - I_1 = 0$

для контура $abcd$: 2) $I_1 R_1 + I_2 R_2 = -\varepsilon_1 - \varepsilon_2$;

для контура $abefa$: 3) $-I_2 R_2 + I_3 R_3 = \varepsilon_2 + \varepsilon_3$.

В данной работе исследуется модель простейшей разветвленной электрической цепи, состоящей из трех источников э.д.с. \mathcal{E}_n с внутренними сопротивлениями r_n , подключенных к одному резистору (нагрузке) R (рис.3.7).

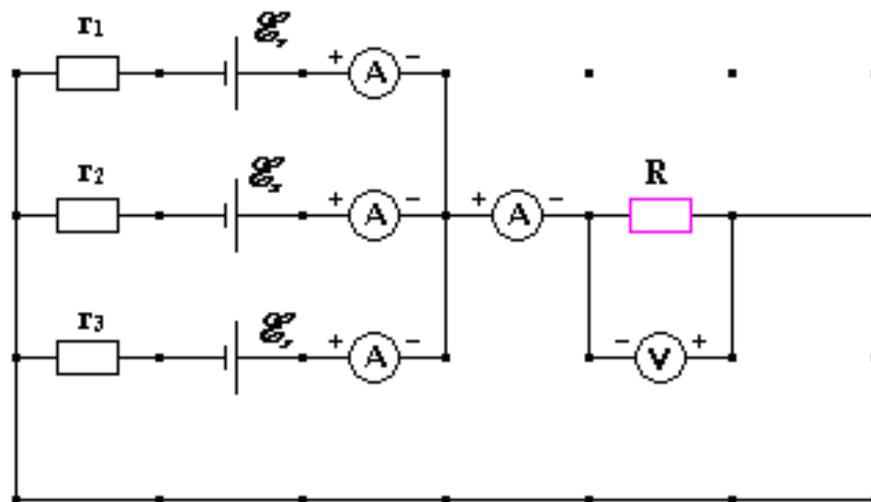


Рис.3.7. Схема электрической цепи для проверки правил Кирхгофа.

Откройте компьютерную модель «Цепи постоянного тока». Внимательно рассмотрите модель, найдите все регуляторы и другие основные элементы. Рассмотрите, какие значки 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.3.8).

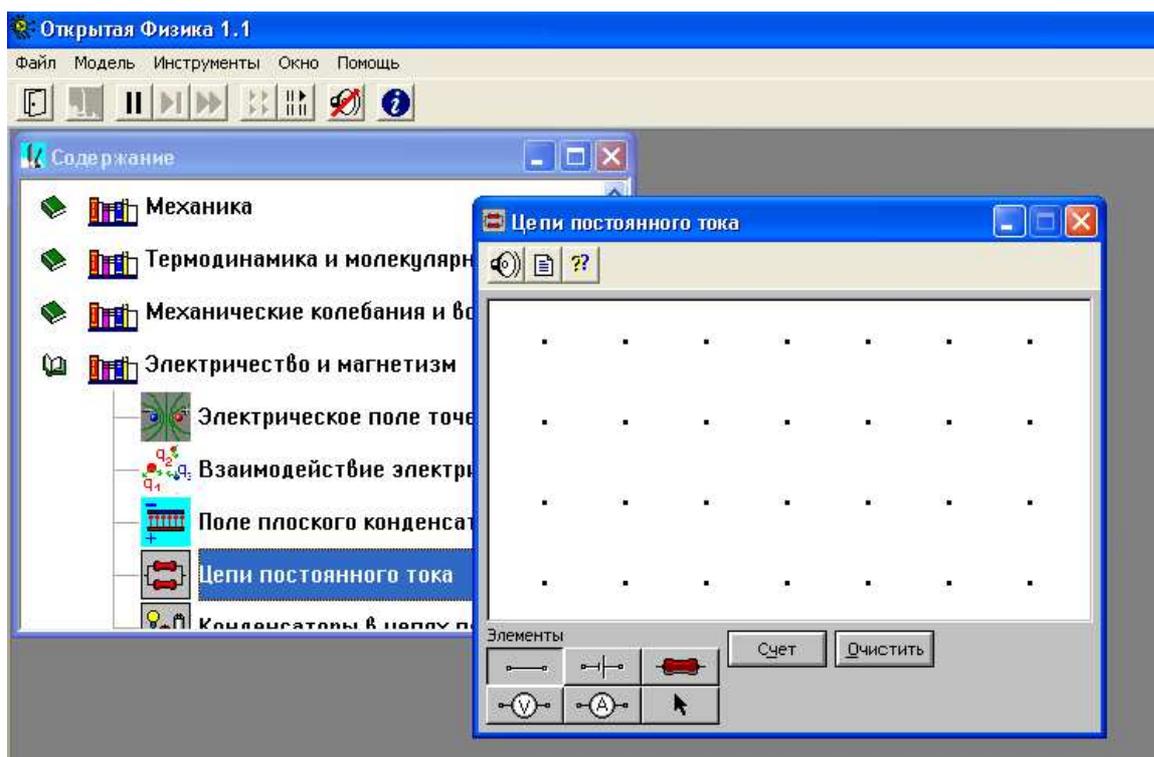


Рис. 3.8.. Диалоговое окно компьютерной модели «Цепи постоянного тока».

Соберите на чистом экране компьютерной модели простейшую электрическую цепь. Для примера соберите цепь, изображенную на рис. 3.9 (следует иметь в виду, что для измерения силы тока амперметр (А) подключают к проводнику последовательно, для измерения напряжения вольтметр (V) подключают к проводнику параллельно).

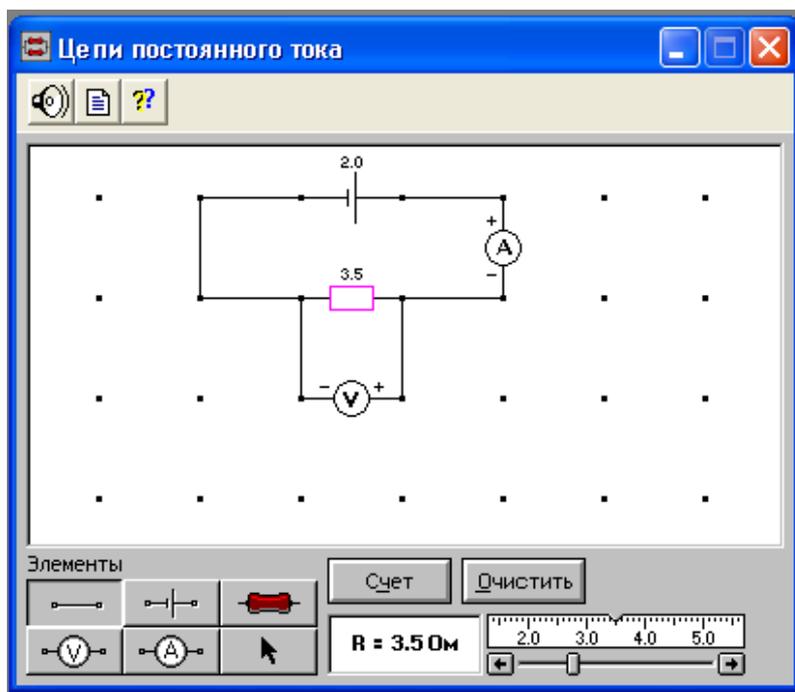


Рис. 3.9. Компьютерная модель «Цепи постоянного тока»

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 окна модели на кнопку резистора. Переместите указатель мыши на рабочую часть экрана, где расположены точки. Щелкните левой кнопкой мыши в рабочей части окна, где будете размещать резистор. После этого появится изображение резистора и цифры 1.0 Ом над ним. ***Всегда при размещении резистора модель автоматически устанавливает значение его сопротивления равное 1.0 Ом.*** В нижней правой части окна 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 указатель 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 по соответствующей кнопке. Переместите указатель мыши в рабочую часть окна модели, где расположены точки. Щелкните левой кнопкой мыши в рабочей части окна, где планируете 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 на кнопку с обозначением провода внизу окна, после чего переместите указатель мыши в рабочую зону схемы. Щелкните левой кнопкой мыши в точке, где проходит провод.

Готовая электрическая схема показана на рис.3.9 в режиме сборки цепи и установки значений необходимых параметров - при этом режиме значения измеряемых величин (тока и напряжения) не показаны.

В компьютерной модели есть две кнопки: «Счет» и «Очистить». При нажатии на кнопку «ОЧИСТИТЬ» рабочее поле окна компьютерной модели очищается. *Нажатие на кнопку «Счет» позволяет снять показания измерительных элементов электрической цепи – амперметра и вольтметра.* Например, собранная ранее схема (рис.3.9) после нажатия на кнопку «Счет» показывает значения тока "0.57А" и напряжения "2.00В" (рис.3.10).

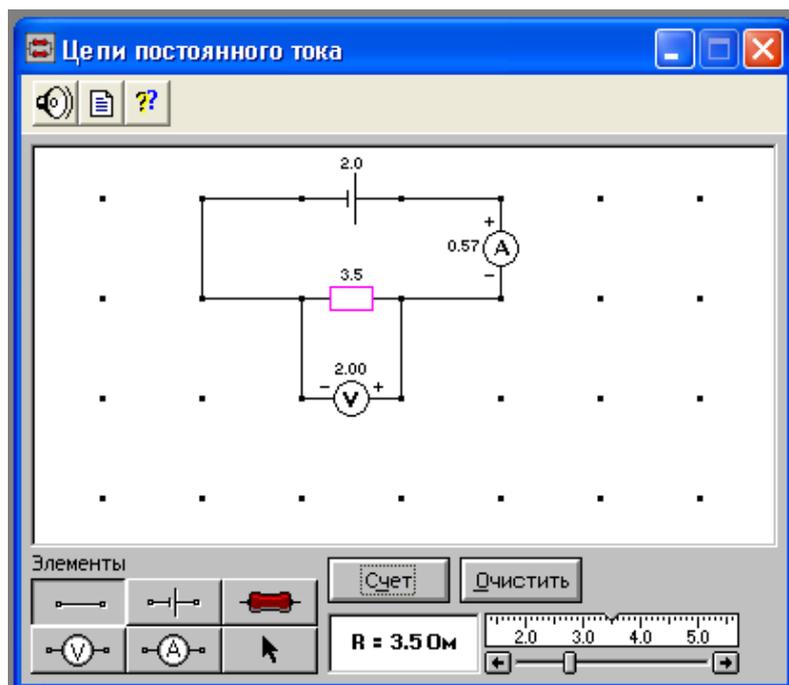


Рис. 3.10. Компьютерная модель «Цепи постоянного тока» в режиме «Счет».

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 указатель 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 следует установить элементы цепи и их численные значения, как описано выше.

Изменять значения э.д.с. \mathcal{E} и сопротивлений R уже созданной схемы можно только в 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 указатель 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: дважды щелкнуть левой кнопкой мыши по кнопке с обозначением элемента, далее - по кнопке с обозначением стрелочки, затем - по элементу в схеме компьютерной модели.

Порядок выполнения работы

1. Нарисуйте в конспекте схему электрической цепи (рис.3.7). Укажите знаки э.д.с. ("+" и "-"), направления токов на каждом участке и направления обхода каждого замкнутого контура, укажите узел электрической цепи. Используя правила Кирхгофа, составьте систему уравнений для нахождения токов на 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.3.7), устанавливая значения источников э.д.с. \mathcal{E} и их внутренние сопротивления r_n , взяв их из табл. 3.1 для вашего варианта.

Таблица 3.1

Значения э.д.с. и внутренних сопротивлений (не перерисовывать).

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

3. Установите сопротивление резистора нагрузки (например, $R = 10\text{ Ом}$). Измерьте значения всех токов и напряжения на нагрузке (щелкнув левой кнопкой мыши по кнопке «Счет») и запишите их в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Результаты измерений

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

4. Изменяя сопротивление нагрузки R , повторите измерения параметров токов и напряжения и запишите их в табл.3.2 (значения R брать из табл.3.2: для четных вариантов R принимает четные значения, для нечетных вариантов R принимает нечетные значения).

Обработка результатов измерений

1. Используя систему уравнений для нахождения токов I , I_1 , I_2 , I_3 в каждом участке замкнутой цепи (см. п. 1 в разделе "Порядок выполнения работы"), рассчитайте значения всех токов для каждого сопротивления нагрузки и запишите их в табл. 3.3. Сравните их с результатами измерений (см. табл. 3.2).

Таблица 3.3

Результаты расчета

R , Ом	I_1 , А	I_2 , А	I_3 , А	I , А

2. Постройте график экспериментальной зависимости падения напряжения U на нагрузке при разных значениях сопротивления R_i от тока I , проходящего через эту нагрузку.

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. 2007.

Дополнительный

Калашиников С.Г. Электричество. М.: Физматлит, 2006.

Сивухин Д.В. Общий курс физики. М.: 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 э.д.с. \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?

Расчетно-графическая работа № 1 – 4

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПРЯМОГО ТОКА

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

Цель работы

Компьютерное моделирование магнитного поля прямого провода с током и подтверждение закономерностей него; 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.

Магнитное поле — это форма материи, окружающая движущиеся электрические заряды. Магнитное поле является составной частью электромагнитного поля.

Магнитное поле характеризуют силовой характеристикой - вектором магнитной индукции \vec{B} . Направление вектора магнитной индукции \vec{B} совпадает с направлением северного полюса магнитной стрелки, которая помещена в данную точку поля. Следует отметить, что направление вектора \vec{B} может быть также определено по силовому действию магнитного поля на прямолинейный проводник с током и по вращающему действию магнитного поля на замкнутый контур с током.

Индукция магнитного поля – это физическая величина, равная отношению максимальной силы Ампера, действующей на проводник с током в магнитном поле, к силе тока в этом проводнике и его длине в магнитном поле:

$$B = \frac{F_{\max}}{I\ell}, \quad (4.1)$$

где I — сила тока в проводнике, ℓ — его длина в магнитном поле.

Согласно формуле (4.1), определена единица измерения магнитной индукции в СИ — тесла (Тл).

Магнитное поле, как и электрическое, невидимо и оно не действует на наши органы чувств, но его можно изобразить графически посредством *силовых магнитных линий*. Силовые линии магнитного поля всегда замкнуты (не имеют начала и конца), поэтому магнитное поле является *вихревым полем*, в отличие от электростатического поля, силовые линии которого всегда разомкнуты и начинаются или оканчиваются на зарядах, или уходят в бесконечность.

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) (рис. 4.1).

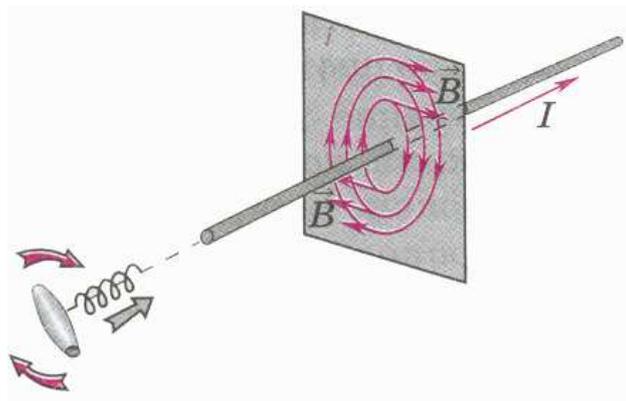


Рис. 4.1. Силовые линии магнитного поля прямого тока.

На рис.4.1 показаны силовые линии магнитной индукции прямолинейного проводника с током: они имеют вид окружностей с центром на оси проводника, вектор индукции магнитного поля \vec{B} направлен по касательной к силовой линии в каждой её точке. Так будет, если магнитная линия кривая, а если она прямая, то вектор индукции магнитного поля сонаправлен с ней.

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

$$B = \mu_0 \mu \frac{I}{2\pi r}. \quad (4.2)$$

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 (4.2) следует, что чем ближе к проводнику с током, тем больше величина магнитной индукции и тем гуще располагаются магнитные линии.

В формуле (4.2) $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{Н/А}^2$ (или Гн/м) — **магнитная постоянная**, величина которой зависит только от выбора системы единиц (здесь она дана в СИ), μ — относительная магнитная проницаемость среды, в которой располагается проводник с током (для вакуума или воздуха $\mu = 1$).

Перепишав формулу (4.2) для $\mu = 1$ в виде

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left(\frac{1}{r} \right), \quad (4.3)$$

можно сделать вывод, что для постоянного значения силы тока ($I = const$) 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** μ_0 , воспользовавшись формулой

$$\mu_0 = \frac{2\pi}{I} \frac{\Delta B}{\Delta\left(\frac{1}{r}\right)}, \quad (4.4)$$

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

Откройте компьютерную модель «Магнитное поле прямого тока» (рис.4.2). 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 «Силовые 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 «Силовые линии» и «Железные опилки». Сделайте вывод (что изменилось в поле компьютерной модели и почему?).

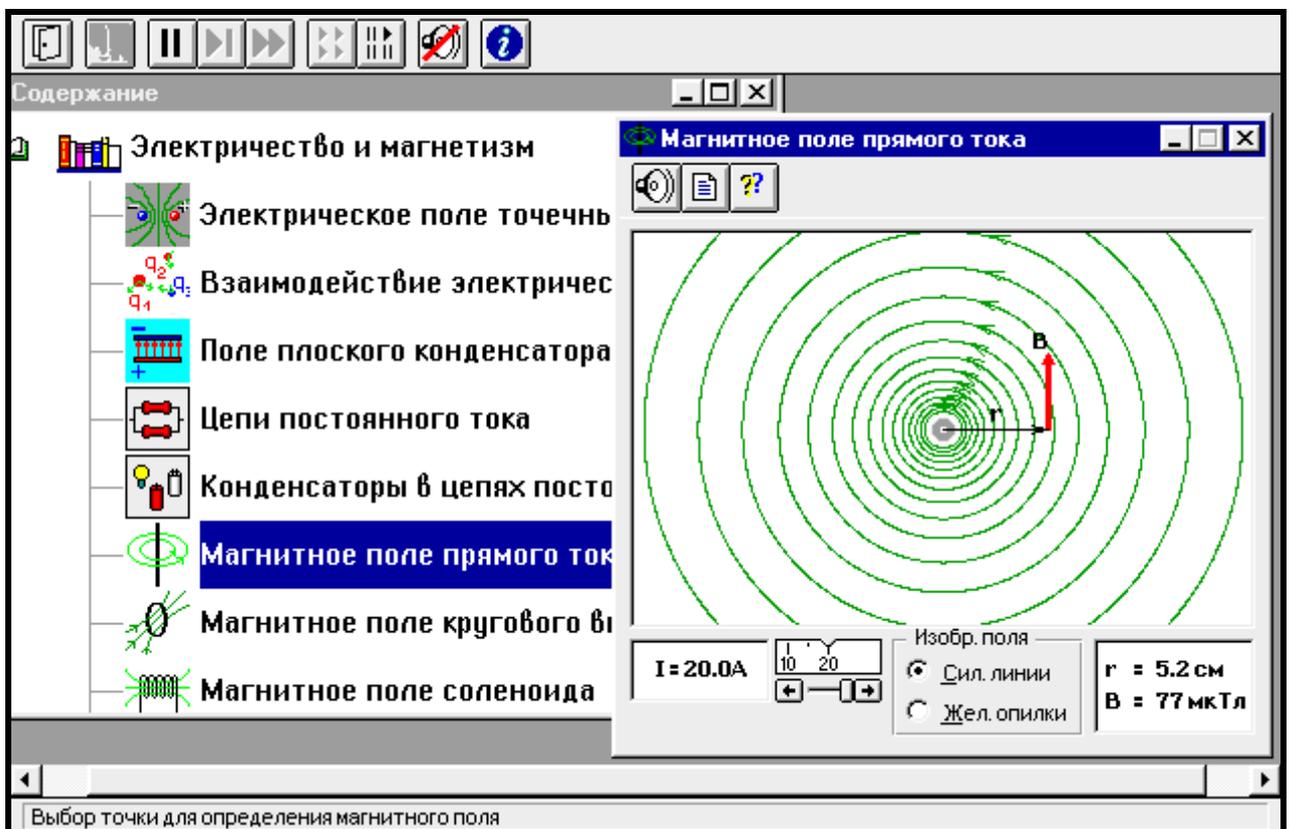


Рис. 4.2. Диалоговое окно компьютерной модели «Магнитное поле постоянного тока».

Точка поля для исследования магнитного поля выбирается установкой указателя мыши в рабочую часть окна модели; при этом указатель мыши приобретает вид руки, которую нужно перемещать в заданном направлении на необходимое расстояние, а в правом нижнем углу окна модели указывается численное значение расстояния и величины индукции магнитного поля. Например, для $I = 20\text{А}$ на расстоянии $r = 5.2\text{ см}$ величина индукции магнитного поля $B = 77\text{ мкТл}$.

Порядок выполнения работы

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

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

2. "Зацепив" мышью, перемещайте движок регулятора тока. Зафиксируйте величину тока I_1 , указанную в табл. 4.1 для вашего варианта.

Таблица 4.1

Значения величины тока (не перерисовывать).

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

3. Перемещая мышью «руку» вблизи провода, нажмите левую кнопку мыши на расстоянии $r = 2\text{ см}$ до оси провода (значения расстояния r указаны в табл. 4.2).

4. Запишите значение величины индукции магнитного поля B_1 в табл. 4.2.

Результаты измерений магнитной индукции

r , см	2	4	6	8	10
$1/r$, м ⁻¹					
B_1 , Тл					
B_2 , Тл					
B_3 , Тл					
B_4 , Тл					

5. Устанавливая расстояния от оси провода 4, 6, 8 и 10 см, измерьте величину индукции магнитного поля B_1 и запишите полученные значения в табл. 4.2.

6. Повторите измерения для трех других значений тока из табл.4.1.

Обработка результатов измерений

1. Вычислите и запишите в табл.4.2 значения отношения $1/r$ (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

$$\mu_0 = \frac{2\pi}{I_i} \frac{\Delta B}{\Delta\left(\frac{1}{r}\right)}, \quad (4.5)$$

где I_i - величина силы тока, ΔB и $\Delta\left(\frac{1}{r}\right)$ - соответственно 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. 2007.

Дополнительный

Калашиников С.Г. Электричество. М.: Физматлит, 2006.

Сивухин Д.В. Общий курс физики. М.: 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 (контура) 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.

Расчетно-графическая работа № 1 – 5

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ СОЛЕНОИДА

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

Цель работы

Компьютерное моделирование магнитного поля кругового витка (контура) с током и соленоида и подтверждение закономерностей для этих полей; 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.

Магнитное поле — это форма материи, окружающая движущиеся электрические заряды. Магнитное поле является составной частью электромагнитного поля.

Магнитное поле характеризуют силовой характеристикой - **вектором магнитной индукции \vec{B}** . Направление вектора магнитной индукции \vec{B} совпадает с направлением северного полюса магнитной стрелки, которая помещена в данную точку поля. Следует отметить, что направление вектора \vec{B} может быть также определено по силовому действию магнитного

поля на прямолинейный проводник с током и по вращающему действию магнитного поля на замкнутый контур с током.

Индукция магнитного поля – это величина, равная отношению максимальной силы Ампера, действующей на проводник с током в магнитном поле, к силе тока в этом проводнике и его длине в магнитном поле:

$$B = \frac{F_{\max}}{I\ell}, \quad (5.1)$$

где I — сила тока в проводнике, ℓ — его длина в магнитном поле.

В СИ магнитную индукцию измеряют в теслах (Тл).

Магнитное поле, как и электрическое, невидимо и оно не действует на наши органы чувств, но его можно изобразить графически посредством силовых магнитных линий. Силовые линии магнитного поля всегда замкнуты (не имеют начала и конца), поэтому магнитное поле является вихревым полем, в отличие от электростатического поля, силовые линии которого всегда разомкнуты и начинаются или оканчиваются на зарядах, или уходят в бесконечность

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.

Магнитное поле кругового тока. Пусть ток силой I течет по круговому проводнику (т. е. проводник имеет форму окружности) радиусом R . При этом магнитные линии этого тока тоже будут иметь вид окружностей, охватывающих проводник и располагающихся в плоскостях, перпендикулярных проводнику. Если вращать головку правого винта по току (или согнуть полукругом пальцы правой руки в направлении тока I), то его поступательное движение (или большой палец правой руки) покажет направление вектора индукции поля кругового тока в его центре (см. рис.5.1)

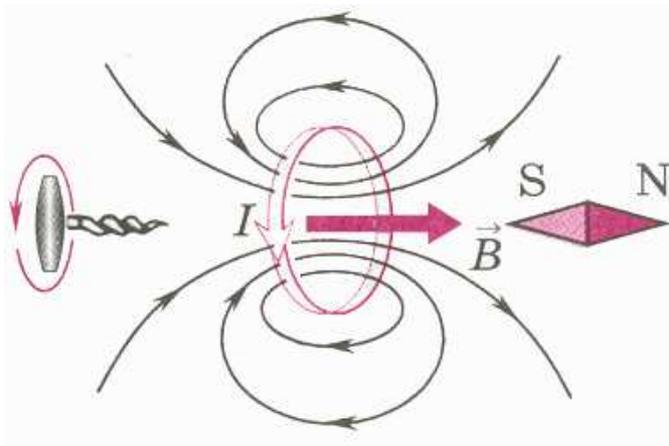


Рис. 5.1. Силовые линии магнитного поля кругового тока.

На рис.5.1 круговой ток течет по часовой стрелке и вектор индукции магнитного поля этого тока \vec{B} направлен в центре кругового тока от нас горизонтально вправо (убедитесь в этом самостоятельно с помощью своей правой руки). *Величина индукции магнитного поля в центре кругового тока прямо пропорциональна силе тока и обратно пропорциональна его радиусу.*

$$B = \mu_0 \mu \frac{I}{2R} \quad (5.2)$$

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

$$B = \frac{\mu_0 \mu}{2\pi} \frac{IS}{(R^2 + r^2)^{3/2}} \quad (5.3)$$

В формулах (5.2) и (5.3) $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{Н/А}^2$ (или Гн/м) — *магнитная постоянная*, величина которой зависит только от выбора системы единиц (здесь она дана в СИ), μ — относительная магнитная проницаемость среды, в которой располагается проводник с током (для вакуума или воздуха $\mu = 1$).

Перепишав формулу (5.3) для $\mu = 1$ в виде

$$B = \frac{\mu_0 IS}{2\pi} \frac{1}{(R^2 + r^2)^{3/2}} \quad (5.4)$$

можно сделать вывод, что для постоянного значения силы тока ($I = \text{const}$) 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* μ_0 , воспользовавшись формулой

$$\mu_0 = \frac{2\pi}{IS} \frac{\Delta(B)}{\Delta\left(\frac{1}{(R^2 + r^2)^{3/2}}\right)}, \quad (5.5)$$

где ΔB - 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*. Линии магнитной индукции соленоида, «проявленные» с помощью железных опилок, изображены на рис.5.2.

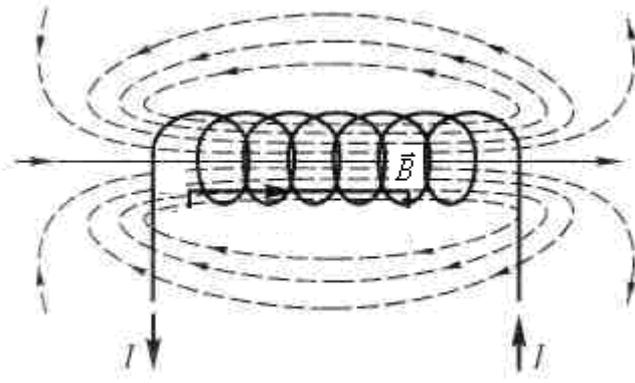


Рис.5.2. Силовые линии магнитного поля соленоида.

Из рис.5.2 следует, что линии магнитной индукции входят в соленоид с одного края и выходят из другого, огибая его с внешней стороны. Видно также, что магнитное поле внутри соленоида однородно (линии магнитной индукции параллельны) и наиболее интенсивно (большая плотность линий магнитной индукции). Вне соленоида поле неоднородно и очень слабое. Направление магнитной индукции \vec{B} поля тока в соленоиде определяют по правилу правого винта так же, как для кругового тока.

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,

$$\vec{B} = \sum_i \vec{B}_i \quad (5.6)$$

поэтому магнитное поле соленоида представляет собой совокупность магнитных полей всех его витков.

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

$$B = \mu_0 \frac{NI}{L}, \quad (5.7)$$

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

Откройте поочередно компьютерную модель «Магнитное поле кругового витка с током» (рис.5.3), затем модель «Магнитное поле соленоида» (рис.5.4). 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 «Силовые 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 «Силовые линии» и «Железные опилки». Сделайте вывод (что изменилось в поле компьютерной модели и почему?).

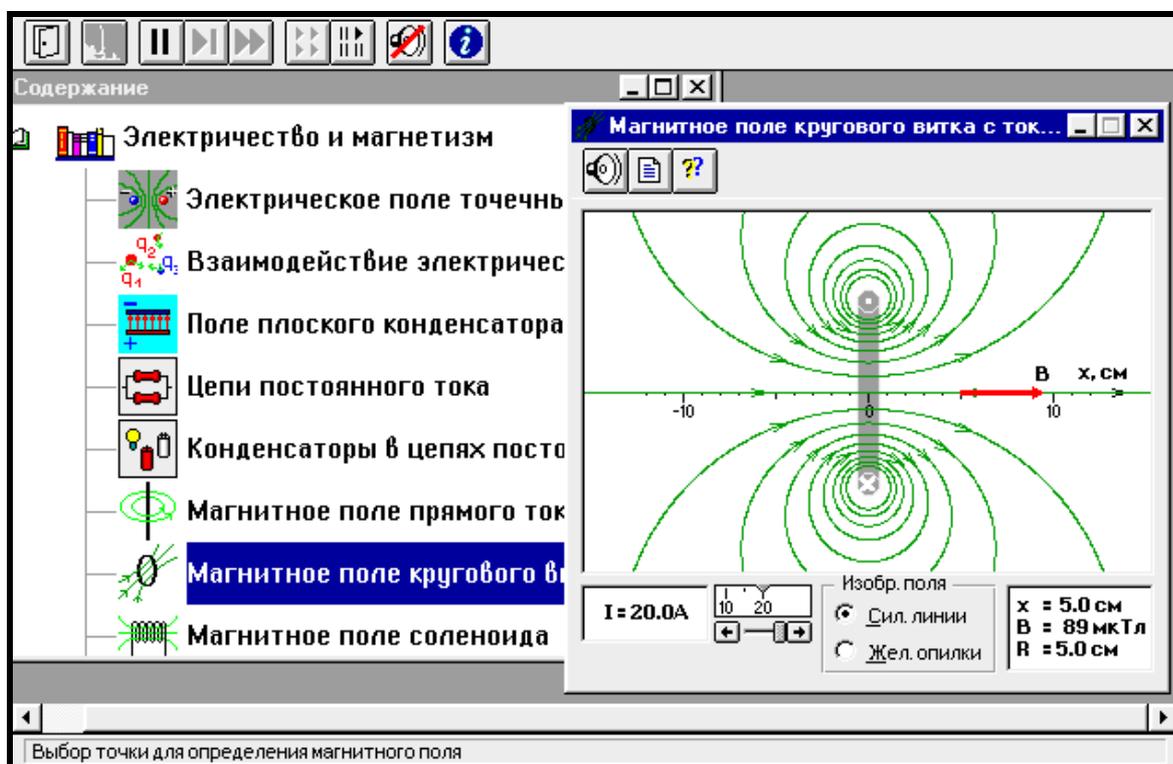


Рис. 5.3. Диалоговое окно компьютерной модели «Магнитное поле кругового витка с током».

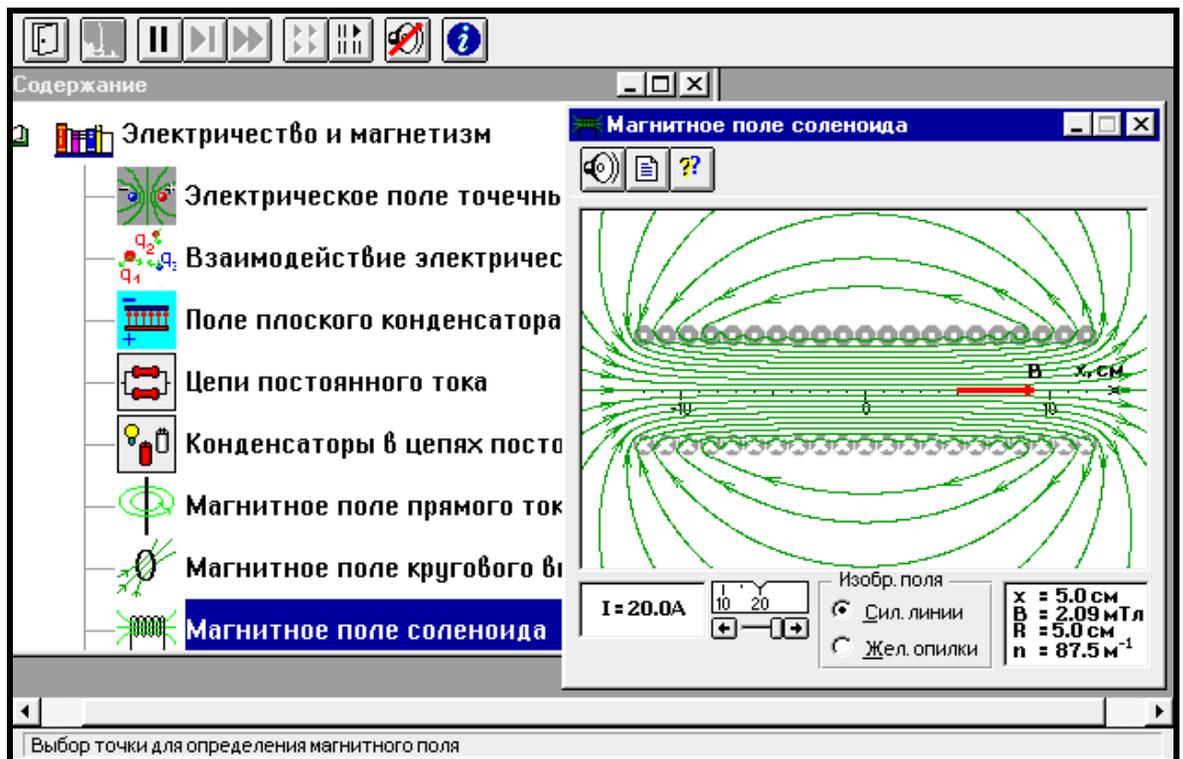


Рис. 5.4. Диалоговое окно компьютерной модели «Магнитное поле соленоида».

Точка поля для исследования магнитного поля выбирается установкой указателя мыши в рабочей части окна модели, при этом указатель мыши приобретает вид руки, которую нужно перемещать в заданном направлении на необходимое расстояние, а в правом нижнем углу окна модели указываются численные значения расстояния и величины индукции магнитного поля. Например, на рис.5.3 для $I = 20\text{A}$ 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 левой кнопкой мыши, виртуальный эксперимент «Магнитное поле кругового витка с током». Выберите режим "Силовые линии".

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

2. "Зацепив" мышью, перемещайте движок регулятора тока. Зафиксируйте величину тока I_1 , указанную в табл.5.1 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 табл. 5.2).

4. Запишите значение величины индукции магнитного поля B_1 в табл. 5.2.

5. Последовательно устанавливая расстояния от центра витка 4, 6, 8 и 10см, измерьте величину индукции магнитного поля B_1 и запишите полученные значения в табл. 5.2.

6. Повторите измерения по п. 2 - 5 для трех других значений тока из табл. 5.1.

Таблица 5.1

Значения величины тока (не перерисовывать).

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

Таблица 5.2

Результаты измерений магнитной индукции поля кругового витка с током

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

Эксперимент 2

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

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

2. "Зацепив" мышью, перемещайте движок регулятора тока. Зафиксируйте величину тока I_1 , указанную в табл. 5.1 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 табл. 5.3).

Таблица 5.3

Результаты измерений магнитной индукции поля соленоида

r , см	2	4	6	8	10
B_1 , Тл					
B_2 , Тл					
B_3 , Тл					
B_4 , Тл					

4. Запишите значение величины индукции магнитного поля B_1 в табл. 5.3.

5. Последовательно устанавливая расстояния от центра витка 4, 6, 8 и 10см, измерьте величину индукции магнитного поля соленоида B_1 и запишите полученные значения в табл. 5.3.

6. Повторите измерения по п. 2 - 5 для трех других значений тока из табл. 5.1.

Обработка результатов измерений

1. Вычислите и запишите в табл. 5.2 значения отношения $1/r$ для второй строки (обратите внимание на размерности величин в строках).

2. Постройте *на одном листе* графики изменения величины индукции магнитного поля (B) на оси витка с током на расстоянии r от плоскости витка 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

$$\mu_0 = \frac{2\pi}{I_i S} \frac{\Delta(B)}{\Delta\left(\frac{1}{(R^2 + r^2)^{3/2}}\right)} \quad (5.8)$$

где I_i - величина силы тока, ΔB и $\Delta\left(\frac{1}{(R^2 + r^2)^{3/2}}\right)$ - соответственно приращение функции и аргумента для этого значения 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 Δr , 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.. 2007.

Дополнительный

Калашиников С.Г. Электричество. М.: Физматлит, 2006.

Сивухин Д.В. Общий курс физики. М.: 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 $B_0 = 50\text{ мкТл}$.

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

Компьютерное моделирование движения заряженных частиц в электрическом, магнитном и электромагнитном полях, ознакомление с принципом работы масс – спектрометра и 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 — это форма материи, окружающей электрически заряженные тела. Электрическое поле является составной частью единого электромагнитного поля. Электрическое поле невидимо, но для того, чтобы показать, как оно распределено в пространстве, его можно изобразить графически с помощью линий вектора напряженности электрического поля \vec{E} , которые также называют *силовыми линиями* (линии напряженности) электрического поля. *Силовые линии — воображаемые линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора напряженности \vec{E} в данной точке поля. Поле, в каждой точке которого вектор напряженности остается постоянным по величине и направлению, называется однородным.* Линии вектора*

напряженности (силовые линии) однородного электрического поля представляют собой параллельные прямые, распределенные по пространству с одинаковой густотой, т. е. отстоящие друг от друга на равных расстояниях. Примером однородного поля является поле бесконечной равномерно заряженной плоской поверхности. Кроме того, однородным является поле между двумя разноименно заряженными бесконечными плоскими поверхностями с равномерным распределением и одинаковой поверхностной плотностью зарядов на них (рис. 6.1).

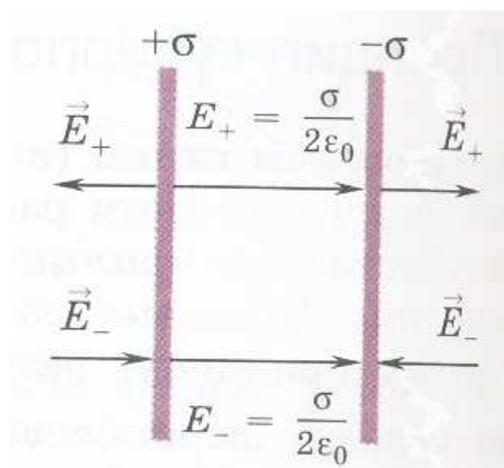


Рис. 6.1 Пример однородного электрического поля

Каждая заряженная поверхность создает с обеих сторон свое поле. При этом силовые линии обоих полей между поверхностями сонаправлены, поэтому результирующая напряженность вдвое больше напряженности поля каждой поверхности. Слева и справа от поверхностей силовые линии их полей антинаправлены. А так как напряженности полей, созданных каждой поверхностью, равны по модулю друг другу, то результирующие напряженности там равны нулю.

Поле плоского конденсатора, обкладки которого заряжены разноименно, можно считать однородным, если расстояние между обкладками во много раз меньше их линейных размеров. У границ обкладок конденсатора однородность поля нарушается и силовые линии искривляются.

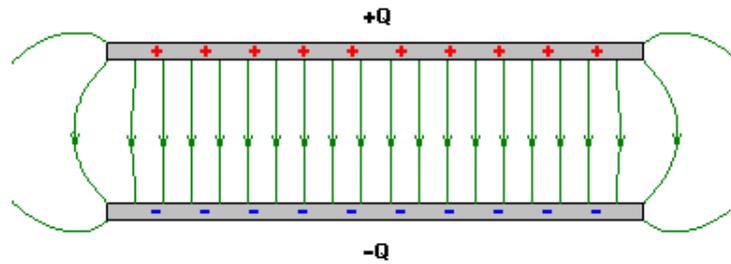


Рис.6.2. Линии напряженности электрического поля плоского конденсатора

На любой заряд q , размещенный в данную точку поля, со стороны электрического поля напряженностью \vec{E} , действует сила, которая определяется формулой (6.1)

$$\vec{F}_s = q\vec{E}, \quad (6.1)$$

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

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = q\vec{E}. \quad (6.2)$$

Это 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, двигающаяся первоначально вдоль оси ОХ со скоростью \vec{v}_0 , влетает в электрическое поле плоского конденсатора параллельно его пластинам. Если расстояние между пластинам мало по сравнению с их длиной L , то краевыми эффектами можно пренебречь и считать электрическое поле между пластинами однородным. Направляя ось ОУ 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

$$\frac{dv_x}{dt} = 0, \dots \quad \frac{dv_y}{dt} = \frac{q}{m} E \dots \quad (6.3)$$

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 (6.3), получаем

$$v_x = \frac{dx}{dt} = const = v_0 \quad (6.4)$$

$$v_y = \frac{dy}{dt} = \frac{q}{m} Et + C, \quad (6.5)$$

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

$$v_y = \frac{dy}{dt} = \frac{q}{m} E \frac{L}{v_0} \dots \quad (6.6)$$

Для равноускоренного движения по вертикали при $v_{0y} = 0$ и $v_{0x} = v_0$ получаем

$$Y = \frac{q E}{m} \left(\frac{L}{V_{0x}} \right)^2. \quad (6.7)$$

Магнитное поле — это форма материи, окружающая движущиеся электрические заряды. Магнитное поле является составной частью электромагнитного поля и его, так же как электрическое поле, можно изобразить графически с помощью линий вектора индукции \vec{B} магнитного поля, которые также называют *силовыми линиями*. 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. Магнитное поле характеризуют силовой характеристикой — вектором магнитной индукции \vec{B} . 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.

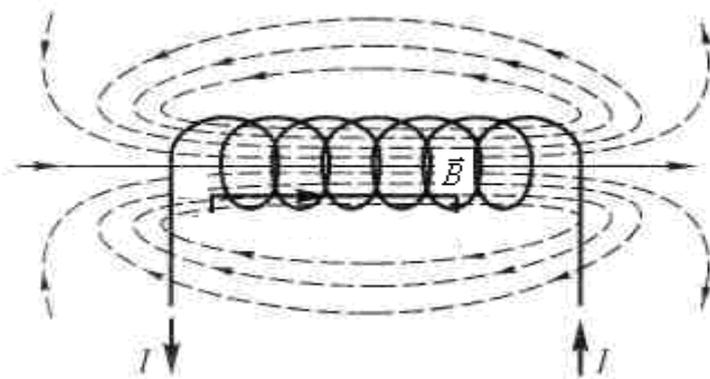


Рис.6.3. Линии напряженности индукции магнитного поля соленоида

На движущиеся в магнитном поле заряженные частицы действует сила, определяемая формулой

$$\vec{F}_m = q[\vec{v}\vec{B}], \quad (6.8)$$

где q – это заряд частицы, движущейся со скоростью \vec{v} в магнитном поле, магнитная индукция которого равна \vec{B} . В скалярном виде эту силу записывают в виде уравнения (6.9)

$$F_m = qvB \sin \alpha, \quad (6.9)$$

где α — угол между вектором скорости \vec{v} и вектором 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 (6.8) 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 (6.9), 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

$$F_m = qvB. \quad (6.10)$$

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 (6.12)

$$qvB = \frac{mv^2}{R}. \quad (6.11)$$

$$R = \frac{m v}{q B} \quad (6.12)$$

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

$$T = \frac{2\pi R}{v}. \quad (6.13)$$

3. *Заряженная частица влетает в однородное магнитное поле со скоростью \vec{v} под углом α 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

$$\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v}\vec{B}] \quad (6.14)$$

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. 6.4), через которые пролетают ионы.

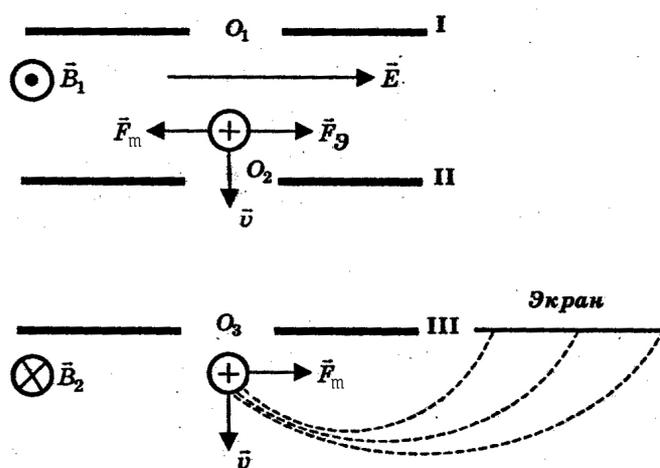


Рис.6.4. Схема масс-спектрометра.

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.6.4 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.6.4 от нас за чертеж) перпендикулярно скорости иона \vec{v} . При этом на него начинает действовать сила магнитного поля

$$F_M = qvB_2, \quad (6.15)$$

под действием которой ион станет двигаться по дуге окружности радиусом R

$$R = \frac{m \cdot v}{q \cdot B_2}. \quad (6.16)$$

Из формулы (6.16) получаем формулу вычисления удельного заряда частицы (q/m)

$$\frac{q}{m} = \frac{v}{B_2 R}. \quad (6.17)$$

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 (6.17) 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" (рис. 6.5). 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).

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 .

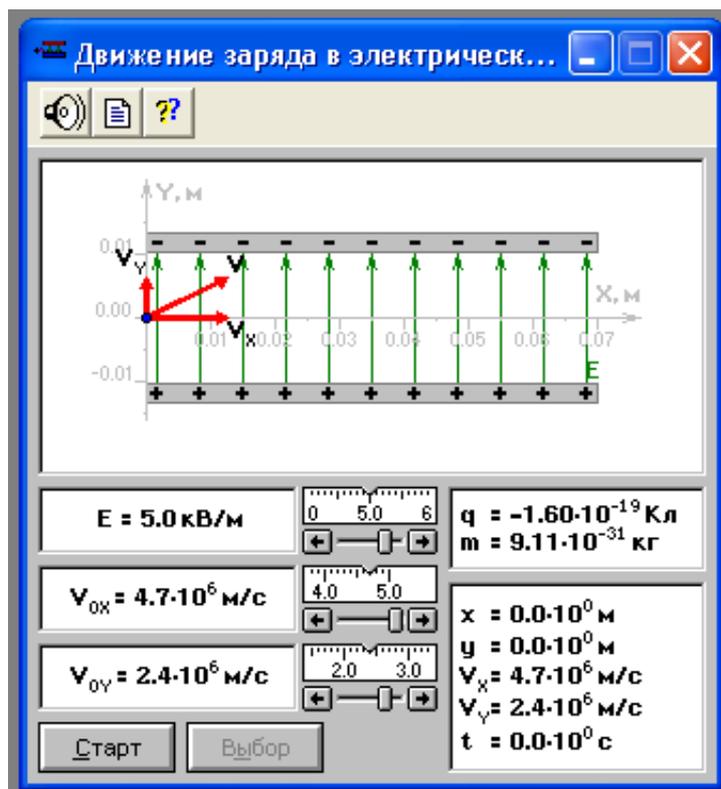


Рис. 6.5. Окно компьютерной модели "Движение заряда в электрическом поле".

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).

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).

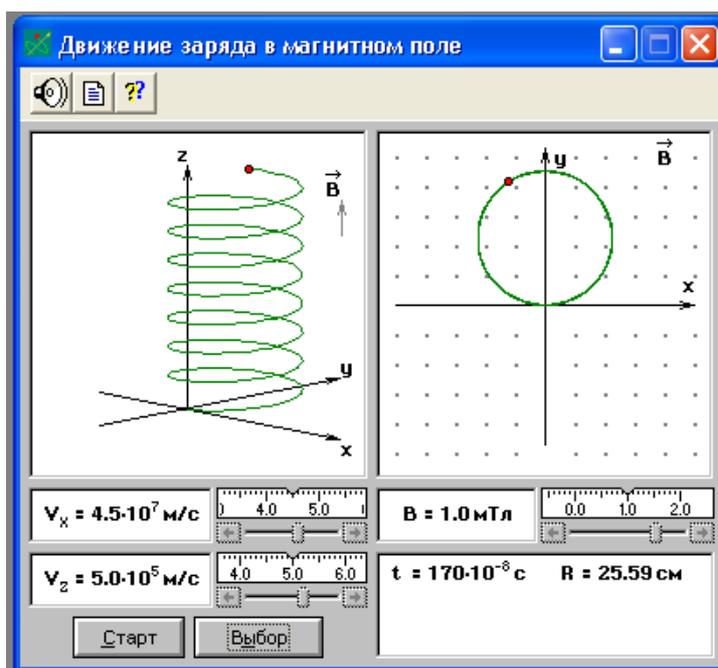


Рис. 6.6. Окно компьютерной модели "Движение заряда в магнитном поле".

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

Откройте компьютерную модель "Масс - спектрометр" (рис.6.7). 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).

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».

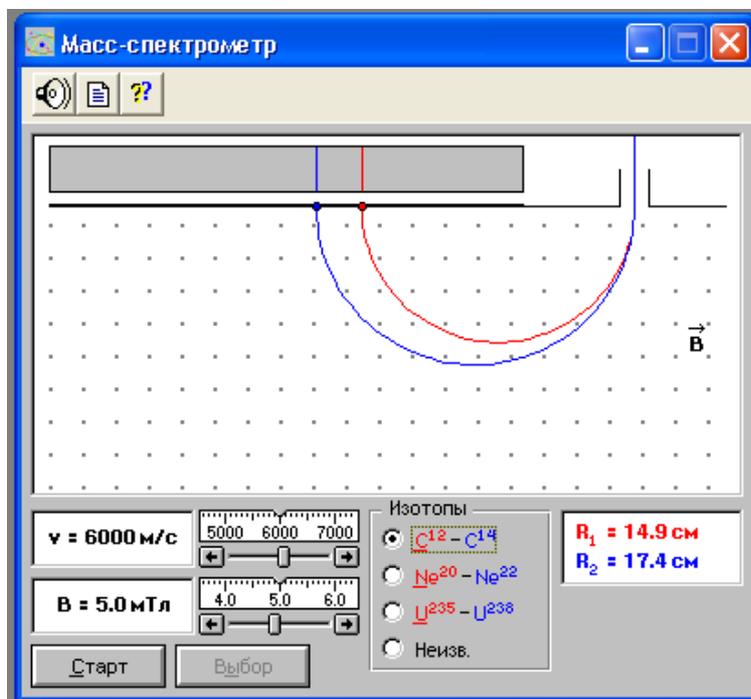


Рис. 6.7. Окно компьютерной модели "Масс - спектрометр".

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 левой кнопкой мыши, виртуальный эксперимент "Движение заряда в электрическом поле" (рис.6.5). Выберите режим "Выбор".

2. Подведя указатель мыши к движку регулятора напряженности E , нажмите левую кнопку мыши и, удерживая ее в нажатом состоянии, установите числовое значение E , равное взятому из таблицы 6.1 для вашего варианта.

Таблица 6.1

**Значения напряженности электрического поля для эксперимента 1
(не перерисовывать).**

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

3. Подведите указатель 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 табл.б. 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 $X, \text{м}$ равняется длине пластин конденсатора ($L = 0,07\text{м}$). 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 табл.б.2.

Таблица 6.2.

Результаты измерений при $E =$ _____ В/м

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

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 табл. 6.2.

Эксперимент 2. "Движение заряда в магнитном поле".

1. Запустите, дважды щелкнув левой кнопкой мыши, виртуальный эксперимент "Движение заряда в магнитном поле" (рис. 6.6). 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 табл.6.3.

Таблица 6.3.

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

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 табл. 6.4 значение радиуса R_1 траектории движения частицы.

Таблица 6.4.

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

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

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 табл.6.3.

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 ZXУ.

10. Запишите в табл. 6.4 значение радиуса R_2 траектории движения частицы.

Эксперимент 3. "Движение заряда в электромагнитном поле".

1. Запустите, дважды щелкнув левой кнопкой мыши, виртуальный эксперимент "Масс - спектрометр" (рис.6.7).

2. Нажмите кнопку "Изотопы C^{12} - C^{14} ".

3. Выберите режим "Выбор". Подведите указатель 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 табл. 6.5 для вашего варианта.

Таблица 6.5

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

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 табл. 6.6 значения радиусов окружностей, по которым двигались эти изотопы (они показаны красным и синим цветом в правом углу окна).

Таблица 6.6

Результаты измерений и расчетов для "Изотопов C^{12} - C^{14} ".

$V, 10^3 \text{ м/с}$							
$R_1, \text{ м}$							
$R_2, \text{ м}$							
$T_1, \text{ с}$							
$T_2, \text{ с}$							
$q_1/m_1, \text{ Кл/кг}$							
$q_2/m_2, \text{ Кл/кг}$							

7. Последовательно увеличивая скорость частиц на 10^3 м/с , повторите п. 4-6 ещё 6 раз и заполните табл. 6.6.

8. Нажмите кнопку «Изотопы Ne^{20} - Ne^{22} », проведите при установленном в п. 3 для вашего варианта значении V измерения по п.3-7 и заполните табл. 6.7.

Таблица 6.7

Результаты измерений и расчетов для "Изотопов Ne^{20} - Ne^{22} ".

$V, 10^3 \text{ м/с}$							
$R_1, \text{ м}$							
$R_2, \text{ м}$							
$T_1, \text{ с}$							
$T_2, \text{ с}$							
$q_1/m_1, \text{ Кл/кг}$							
$q_2/m_2, \text{ Кл/кг}$							

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

Обработка результатов измерений

Эксперимент 1

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 $(1/V_{0X})$.

2. 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.

3. Рассчитайте среднее значение экспериментально полученного удельного заряда частицы.

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

Эксперимент 2

1. Рассчитайте значение радиуса (R^*_1 и R^*_2) траектории движения заряженной частицы по формуле (6.12), 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 табл.6.4. 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 табл. 6.6 и 6.7.

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 (6.13) периоды движения изотопов углерода и запишите полученные значения в соответствующие графы табл.6.6 и табл.6.7.

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.. 2007.

Дополнительный

Калашиников С.Г. Электричество. М.: Физматлит, 2006.

Сивухин Д.В. Общий курс физики. М.: 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).

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

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

Цель работы

Компьютерное моделирование явления электромагнитной индукции и подтверждение закономерностей этого явления.

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:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (7.1)$$

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

Знак «минус» в формуле (7.1) 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.*

Магнитный поток (Φ) характеризует магнитное поле, пронизывающее поверхность. Рассмотрим плоский контур (рис. 7.1), расположенный в

однородном магнитном поле с магнитной индукцией \vec{B} , положительная нормаль \vec{n} к которому составляет с вектором \vec{B} угол α .

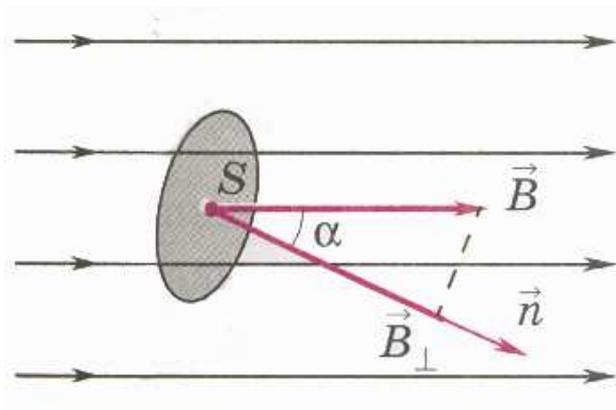


Рис. 7.1. Плоский контур площадью S в магнитном поле индукцией \vec{B} , положительная нормаль \vec{n} к которому составляет с вектором \vec{B} угол α .

Магнитным потоком Φ сквозь поверхность S называют величину

$$\Phi = \int_S \vec{B} d\vec{S} = \int_S \vec{B} \vec{n} dS = |\vec{B}| S \cos \alpha, \quad (7.2)$$

где $d\vec{S} = dS \vec{n}$; а α — это угол между вектором индукции магнитного поля \vec{B} и нормалью \vec{n} к этой поверхности. Единица магнитного потока в СИ— вебер (Вб):

Из формулы (7.1) следует, что появление э.д.с. индукции и соответственно индукционного тока в проводящем контуре может быть вызвано каждой из причин:

- за счет *изменения во времени* индукции магнитного поля

$$|\mathcal{E}_i| = \frac{dB}{dt} S \cos \alpha, \quad (7.3)$$

- за счет *изменения во времени* площади контура

$$|\mathcal{E}_i| = \frac{dS}{dt} B \cos \alpha, \quad (7.4)$$

- за счет *пересечения силовых линий* магнитного поля при *вращении проводника в магнитном поле*

$$|\mathcal{E}_i| = \frac{d(\cos \alpha)}{dt} BS. \quad (7.5)$$

В случае неподвижного проводника изменяющееся со временем магнитное поле порождает *вихревое электрическое поле* \vec{E}^* , силовые линии которого замкнуты и сцеплены с силовыми линиями магнитного поля. Под действием поля \vec{E}^* носители заряда в проводнике приходят в движение – возникает *индукционный ток*.

В случае движущегося проводника появление э.д.с. индукции в проводнике вызвано не вихревым электрическим полем (в данном случае его просто нет, так как магнитное поле постоянно), а действием на свободные электрические заряды движущегося проводника силы Лоренца. Под действием этой силы заряды приходят в движение, что и вызывает появление *индукционного тока*.

Э.д.с. индукции в движущихся проводниках

Пусть проводник длиной l движется с постоянной скоростью \vec{v} в однородном магнитном поле, линии индукции которого направлены вертикально сверху вниз (рис. 7.2). Для простоты будем считать, что вектор \vec{v} составляет прямой угол с осью проводника и с направлением вектора \vec{B} (проводник движется поперек поля).

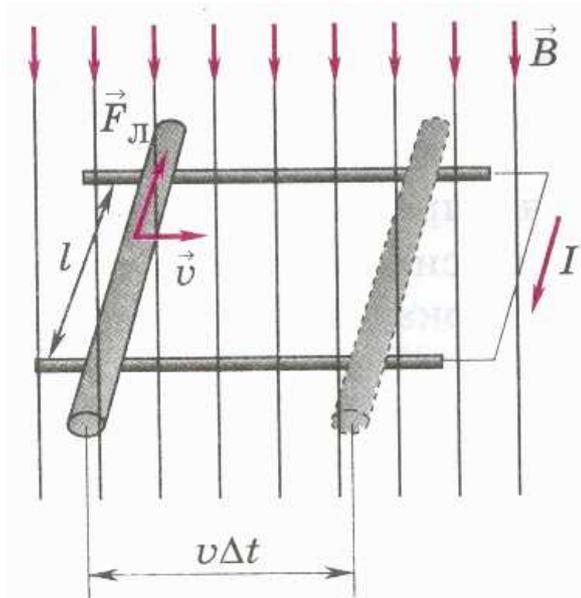


Рис. 7.2. Явление электромагнитной индукции при движении проводника в магнитном поле.

Магнитный поток сквозь образуемый контур за время Δt изменится на величину

$$\Delta\Phi = B\Delta S = B\ell v\Delta t \quad , \quad (7.6)$$

при этом площадь контура при движении проводника изменяется на величину $\Delta S = \ell v\Delta t$. Тогда, согласно закону Фарадея, э.д.с. индукции в контуре равна

$$|\varepsilon_i| = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = B\ell v \quad . \quad (7.7.)$$

На каждый заряд q проводника, движущегося в магнитном поле (заряд движется вместе с проводником), действует сила Лоренца, величина которой вычисляется по формуле

$$F_{\text{л}} = qvB \quad (7.8)$$

(с учётом того, что угол между векторами \vec{v} и \vec{B} прямой), направление силы Лоренца перпендикулярно векторам \vec{v} и \vec{B} .

Остальные проводники рассматриваемого контура неподвижны, в них ЭДС индукции не возникает (на неподвижных участках контура сила Лоренца равна нулю), поэтому возникающая в движущемся проводнике э.д.с. равна э.д.с. индукции всего контура.

В металлах носителями тока являются *отрицательно* заряженные электроны. Создаваемый ими ток в проводнике направлен в сторону, *противоположную* движению электронов. Легко видеть (рис. 7.2), что магнитное поле индукционного тока *внутри* замкнутого контура направлено *против* внешнего поля, что находится в полном соответствии с правилом Ленца. Очевидно, что мы получим *тот же* результат, если носителями тока будут положительные заряды (например, так называемые «дырки» в полупроводниках p -типа).

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 α между вектором индукции магнитного поля \vec{B} и нормалью \vec{n} поверхности равен нулю:

$$d\Phi = B dS, \quad (7.9)$$

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

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{1}{R} \frac{d\Phi}{dt}, \quad (7.10)$$

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 значение длины перемычки L и её сопротивление R , величину и направление скорости движения перемычки \vec{v} и индукции магнитного поля \vec{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. 7.3.) Регистрируется величина магнитного потока Φ , пронизывающего замкнутый контур. Нажатием кнопки "Старт" запускают 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.7.4). При произвольных значениях параметров запустите эксперимент, щелкнув левой кнопкой мыши по кнопке «Старт». Наблюдайте движение перемычки и изменение при этом магнитного потока Φ (цифры внизу окна).

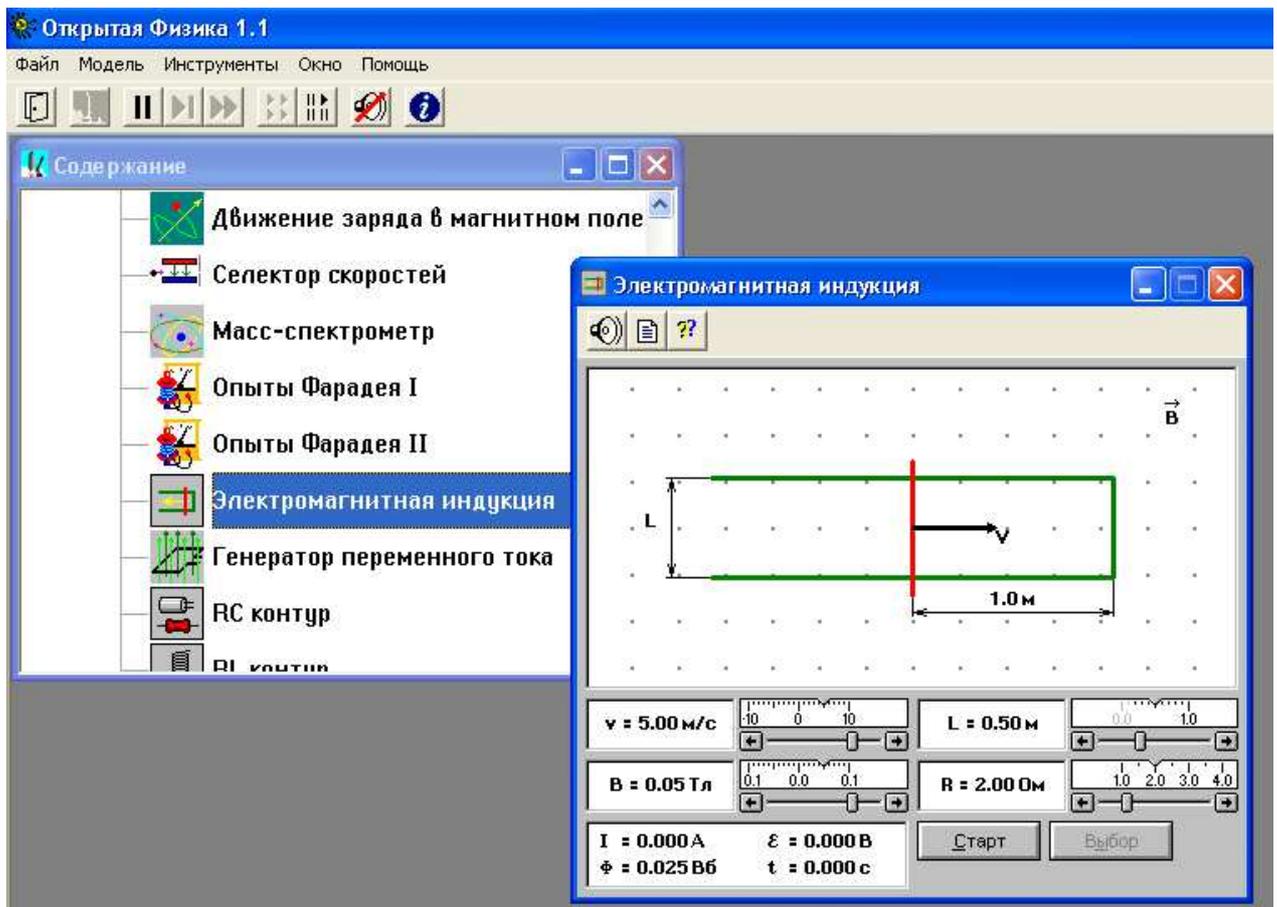


Рис. 7.3. Диалоговое окно компьютерной модели «Электромагнитная индукция» в режиме "Выбор".

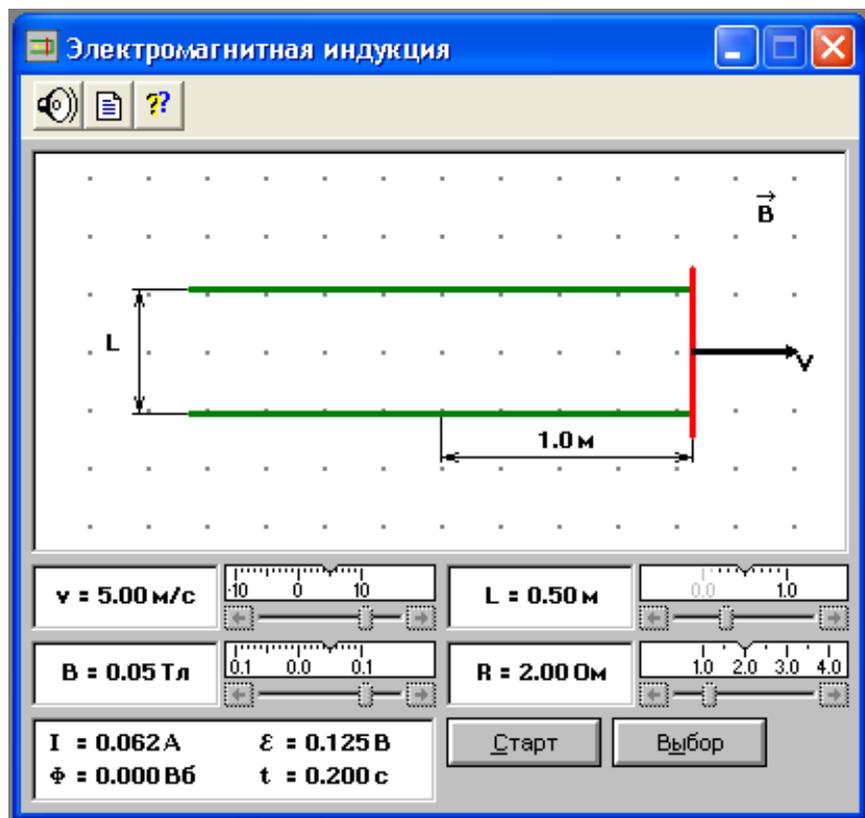


Рис. 7.4. Окно компьютерной модели «Электромагнитная индукция» в режиме "Старт" (по окончании эксперимента).

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 левой кнопкой мыши, 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 табл. 7.1.

Таблица 7.1

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

3. Установив указанное в табл. 7.2 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 табл. 7.2. Повторите измерения для других значений скорости из табл.7.2.

Таблица 7.2

Результаты измерения ЭДС \mathcal{E}_i и тока I при $B_1 =$ Тл.

v (м/с)	-10	-5	5	10
ЭДС \mathcal{E}_i , В				
I , мА				

4. Повторите измерения э.д.с. и тока I в зависимости от скорости движения переключки (согласно п.п. 1 - 3) для двух других значений B_2 и B_3 индукции магнитного поля, выбирая их из табл.7.1. Полученные результаты запишите в таблицы, составив их аналогично табл.7.2.

Эксперимент 2

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

2. "Зацепив" мышью, поочередно перемещайте движки регуляторов L –расстояния между проводами, R – сопротивления переключки, v_1 (м/с) - скорости движения переключки и зафиксируйте их значения, указанные в табл.7.3.

Таблица 7.3

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_1 , (м/с)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
v_2 , (м/с)	2	4	6	8	10	2	3	-4	-3	-2
v_3 , (м/с)	-2	-4	-3	-2	-2	-3	-1	2	3	5

3. Установив указанное в табл. 7.4 значение величины индукции магнитного поля B_1 (Тл), нажмите левую кнопку мыши, когда ее указатель размещен над кнопкой «Старт». Занесите значение э.д.с. тока I в табл. 7.4. Повторите измерения для других значений величины индукции магнитного поля из табл. 7.4.

4. Повторите измерения э.д.с. и тока I в зависимости от значений величины индукции магнитного (согласно п.п. 1 - 3) для двух других значений v_2 и v_3 скорости движения переключки, выбирая их из табл.7.3. Полученные результаты запишите в таблицы, составив их аналогично табл.7.4.

Таблица 7.4

Результаты измерения ЭДС \mathcal{E}_i и тока I при $v_1 =$ (м/с)

В, Тл	0,05	0,1	-0,1	-0,05
ЭДС \mathcal{E}_i , В				
I, мА				

Эксперимент 3

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

2. "Зацепив" мышью, поочередно перемещайте движки регуляторов R – сопротивления переключки, v (м/с) - скорости движения переключки, B_1 – величины индукции магнитного поля и зафиксируйте их значения, указанные в табл. 7.5.

Таблица 7.5

**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_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

3. Установив указанное в табл.7.6 значение L – расстояния между проводами, нажмите левую кнопку мыши, когда ее указатель размещен на кнопке «Старт». Занесите значение э.д.с. и тока I в табл. 7.6. Повторите измерения для других значений величины расстояния между проводниками из табл. 7.6.

Таблица 7.6

Результаты измерения ЭДС \mathcal{E}_i и тока I при $B_1 =$ Тл.

L, м	0,2	0,4	0,6	0,8
ЭДС \mathcal{E}_i , В				
I, мА				

4. Повторите измерения э.д.с. и тока I в зависимости от расстояния между проводами (согласно п.п. 1 - 3) для двух других значений B_2 и B_3 индукции магнитного поля, выбирая их из табл. 7.5. Полученные результаты запишите в таблицы, составив их аналогично табл. 7.6.

Обработка результатов измерений

Эксперимент 1

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

2. Для каждой прямой определите тангенс угла наклона по формуле

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

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 табл.7.7.

Таблица 7.7

Результаты измерений

Индукция магнитного поля	$\operatorname{tg}(\varphi)_{\text{эксп}}$ А·с/м	$\operatorname{tg}(\varphi)_{\text{теор}}$ А·с/м
$B_1 =$ Т		
$B_2 =$ Т		
$B_3 =$ 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 перемычки.

2. Для каждой прямой определите тангенс угла наклона по формуле

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

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

3. Вычислите теоретическое значение тангенса для каждой прямой по формуле

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

4. Заполните табл.7.8.

Таблица 7.8

Результаты измерений

Скорость движения перемычки	$\operatorname{tg}(\varphi)_{\text{эксп}}$ А/Тл	$\operatorname{tg}(\varphi)_{\text{теор}}$ А/Тл
$v_1 =$ м/с		
$v_2 =$ м/с		
$v_3 =$ 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 перемычки .

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

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

4. Заполните табл.7.9.

Таблица 7.9

Результаты измерений

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

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.. 2007.

Дополнительный

Калашиников С.Г. Электричество. М.: Физматлит, 2006.

Сивухин Д.В. Общий курс физики. М.: 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 $B = 0,1 \text{ Тл}$, перпендикулярном плоскости контура. Перемычка массой $m = 5 \text{ г}$ скользит вниз с постоянной скоростью $v = 0,5 \text{ м/с}$. Определите сопротивление перемычки, пренебрегая самоиндукцией контура и сопротивлением остальной части контура.