

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА  
**КРАСНОЯРСКИЙ ИНСТИТУТ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО  
ТРАНСПОРТА**  
Филиал ГОУ ВПО «Иркутский государственный  
университет путей сообщения» в г. Красноярске

Л.А. Кузовникова  
Е.А. Денисова  
Н.Г. Замкова

# **ФИЗИКА**

**ВИРТУАЛЬНЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

**ЧАСТЬ 2. Раздел 3.  
ЭЛЕКТРИЧЕСТВО**

Учебное пособие

Красноярск  
КрИЖТ ИрГУПС  
2011

**Кузовникова Л.А., Денисова Е.А., Замкова Н.Г.**

Кузовникова Л.А. Физика: Виртуальный лабораторный практикум. Часть 2. Раздел 3. Электричество. /Л.А. Кузовникова, Е.А. Денисова, Н.Г. Замкова. – Красноярск: Изд-во КрИЖТ, 2011. - 81 с.

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

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

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

**РЕЦЕНЗЕНТЫ:**

Д-р физ.-мат. наук Втюрин А.Н., зам. директора Института физики СО РАН;

Канд. физ.-мат. наук Жандун М.С., ст. преп. кафедры «Техническая физика» Сибирского государственного аэрокосмического университета им. М.Ф. Решетнева

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

Рекомендовано к печати учебно-методическим советом Красноярского института железнодорожного транспорта.

© Кузовникова Л.А., 2011

© Денисова Е.А., 2011

© Замкова Н.Г., 2011

© Красноярский институт железнодорожного транспорта филиал ГОУ ВПО ИрГУПС в г.Красноярске, 2011

# СОДЕРЖАНИЕ

	<u>СТР.</u>
<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>4</b>
<b>ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ФИЗИКЕ.....</b>	<b>5</b>
<b>ПРИМЕР ОФОРМЛЕНИЯ ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА.....</b>	<b>6</b>
<b>ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ПЕРСОНАЛЬНОГО ОТЧЕТА</b>	<b>7</b>
<b>ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ГРАФИКА.....</b>	<b>7</b>
<b><u>РАЗДЕЛ 3. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО</u></b>	<b>8</b>
Лабораторная работа № 3.1 <b>ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ТОЧЕЧНЫХ ЗАРЯДОВ.....</b>	<b>8</b>
Лабораторная работа № 3.2 <b>ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННОЙ ЧАСТИЦЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ.....</b>	<b>22</b>
Лабораторная работа № 3.3 <b>ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МОЩНОСТИ И К.П.Д. ИСТОЧНИКА ПОСТОЯННОГО ТОКА ОТ ВНЕШНЕЙ НАГРУЗКИ.....</b>	<b>30</b>
Лабораторная работа № 3.4 <b>ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА.....</b>	<b>41</b>
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....</b>	<b>49</b>
<b>НЕКОТОРЫЕ ПОЛЕЗНЫЕ СВЕДЕНИЯ.....</b>	<b>50</b>

## ВВЕДЕНИЕ

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

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

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

## **ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ФИЗИКЕ**

### **Этап 1. Домашняя подготовка**

1. Для изучения сущности физических явлений и законов, которые предстоит исследовать в лабораторной работе, необходимо внимательно просмотреть содержание конспектов лекций по теме лабораторной работы, а также учебные пособия.
2. Оформить свой персональный конспект для допуска к ЛР (готовится дома на листах формата А4).
3. Выполнить Задания для допуска – вывод формул, решение задач.

### **Этап 2. Допуск к лабораторной работе.**

1. Для допуска к выполнению измерений по лабораторной работе необходимо наличие персонального **конспекта** ЛР, выполненного **Задания для допуска** и результатов проведения **Тестирования** компьютерной модели.
2. Преподаватель допускает студента к работе, ставит свою подпись в конспекте студента (графа ДОПУСК в табличке на обложке) и определяет номер варианта задания.

### **Этап 3. Экспериментальная часть**

1. Выполнение наблюдений и измерений опытов в соответствии с методическим руководством и указаниями преподавателя.
2. Заполнение таблиц измерений для отчета о проделанной работе.
3. Преподаватель проверяет таблицу измерений студента и ставит свою подпись в конспекте студента. Таблицы должны быть заполнены чернилами. Для всех величин в таблицах должна быть записана соответствующая единица измерения.

### **Этап 4. Обработка полученных результатов**

1. Вычисление значений расчетных величин по рабочим формулам (расчеты **подробно** записываются в отчете **после написанной формулы**).
2. Построение графиков исследуемых зависимостей. Графики должны удовлетворять всем требованиям, приведенным ниже.
3. Расчеты необходимых величин по графикам.
4. Написание вывода по полученным результатам.

### **Этап 5. Защита лабораторной работы**

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

**ПРИМЕР ОФОРМЛЕНИЯ ПЕРВОЙ СТРАНИЦЫ  
(ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА) ОТЧЕТА:**

Федеральное агентство железнодорожного транспорта

Красноярский институт железнодорожного транспорта -  
Филиал ГОУ ВПО Иркутский государственный университет  
путей сообщения в г. Красноярске

Кафедра «Общепрофессиональные дисциплины»

Лабораторная работа №\_\_  
(Название)

Выполнил:  
студент группы \_\_\_\_  
ФИО \_\_\_\_\_  
Проверил:  
Преподаватель  
ФИО \_\_\_\_\_

Допуск	Измерения	Зачет

Красноярск  
год

---

## Требования к оформлению ПЕРСОНАЛЬНОГО КОНСПЕКТА

### ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** (переписать полностью из описания).

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

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

**ЗАДАНИЯ ДЛЯ ДОПУСКА;**

**ТЕСТИРОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ;**

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

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

**ГРАФИКИ;**

**ВЫВОДЫ;**

**ПИСМЕННЫЕ ОТВЕТЫ НА ВОПРОСЫ;**

**ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ.**

### ТРЕБОВАНИЯ К ГРАФИКУ

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

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

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

# РАЗДЕЛ 3. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.1

### ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ТОЧЕЧНЫХ ЗАРЯДОВ

Запустите программу «Открытая физика». Выберите «Электричество и магнетизм» и «Взаимодействие электрических зарядов».

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Экспериментальное определение величины электрической постоянной.

Экспериментальная проверка теоремы Остроградского-Гаусса.

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

♦ Электрический заряд  $q$  (Кл) – физическая величина, характеризующая свойства тел вступать в электромагнитные взаимодействия. Величина любого заряда кратна элементарному заряду  $q_0$

$$q = N \cdot q_0,$$

где  $N$  – целое число (= 1, 2, 3, 4 и т.д.).

Модуль элементарного заряда  $q_0 = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

♦ Точечным зарядом называется заряд, размерами которого можно пренебречь по сравнению с расстояниями до других тел.

♦ Закон Кулона определяет силу взаимодействия  $\vec{F}_K$  двух точечных зарядов  $q_1, q_2$ , находящихся на расстоянии  $r$  друг от друга: *Сила взаимодействия между двумя неподвижными точечными зарядами прямо пропорциональна произведению модулей зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними*

$$\vec{F}_K = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|} \quad (1)$$

где  $r$  – расстояние между зарядами,

$\frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}$  – единичный вектор вдоль линии, соединяющей заряды,

$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Нм}^2}$  – электрическая постоянная,

$\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды: показывает во сколько раз сила взаимодействия зарядов в вакууме больше, чем в среде. Для вакуума (воздуха)  $\epsilon = 1$ .



**◆ Особенности сил взаимодействия точечных зарядов:**

1) силы взаимодействия могут быть как силами *притяжения*, так и силами *отталкивания* (противоположно заряженные заряды притягиваются, одноименно заряженные – отталкиваются);

2) силы взаимодействия – *центральные силы*. Это значит, что они направлены вдоль прямой, соединяющей взаимодействующие заряды;

3) силы взаимодействия – консервативные силы;

4) сила взаимодействия  $F$  зарядов в среде в  $\epsilon$  раз меньше силы взаимодействия  $F_0$  зарядов в вакууме

$$F = \frac{F_0}{\epsilon}.$$

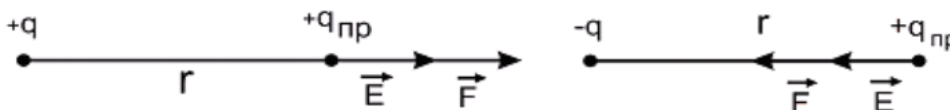
**◆ Электромагнитное поле** – это вид материи, переносящий действие одной заряженной частицы на другую.

**◆ Электростатическое поле** – поле, которое создают *неподвижные* точечные заряды.

**◆ Напряженность электрического поля  $\vec{E}$** , В/м или Н/Кл – векторная величина, численно равная силе, действующей со стороны поля на помещенный в данную точку *единичный пробный заряд*

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_{пр}}, \quad (2)$$

*направление вектора напряженности совпадает с направлением силы, действующей на положительный пробный заряд.*

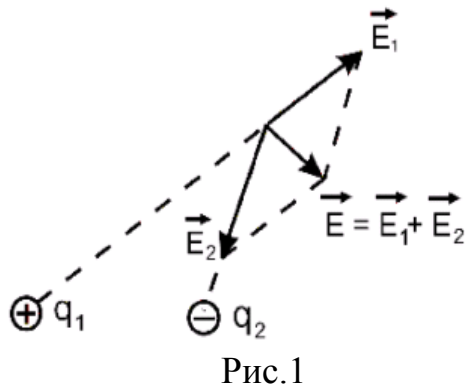


Поскольку напряженность электрического поля численно РАВНА СИЛЕ, с которой поле действует на единичный положительный заряд, то напряженность является **силовой характеристикой электрического поля**.

Зная напряженность  $\vec{E}$ , можно определить силу  $\vec{F}$ , действующую на любой заряд  $q$ , помещенный в данную точку поля:

$$\vec{F} = q\vec{E} \quad (3)$$

**◆ Принцип суперпозиции:** Если электрическое поле создается системой зарядов  $q_1, q_2, \dots, q_n$ , то напряженность результирующего поля равна ВЕКТОРНОЙ сумме напряженностей полей, которые создает каждый заряд в отдельности (рис.1):

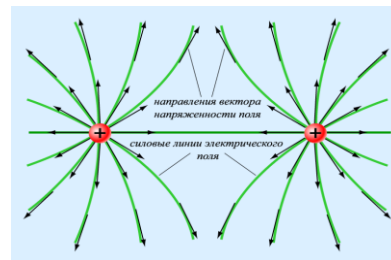
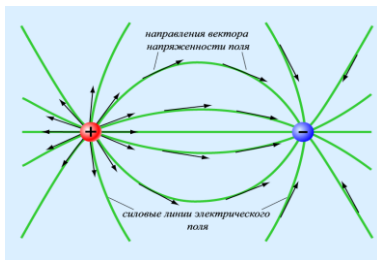


$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i \quad (4)$$

**◆ Напряженность электрического поля точечного заряда.**

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_{пр}} \Rightarrow \vec{E}_{Т.З.} = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|} \quad (5)$$

**◆ Силовые линии электрического поля** - линии, касательные к которым в каждой точке совпадают по направлению с вектором напряженности поля в той же точке. Силовые линии начинаются на положительных зарядах и оканчиваются на отрицательных.



**◆ Работа при перемещении заряда в электростатическом поле**

Работа силы при перемещении тела из точки 1 в точку 2 по определению механической работы равна:

$$A_{12} = \int_1^2 (\vec{F} d\vec{l}).$$

В электростатическом поле на заряд действует кулоновская сила  $\vec{F} = q\vec{E}$ , поэтому работа по перемещению заряда  $q_0$  из точки 1 в точку 2 :

$$A_{12} = q_0 \int_1^2 (\vec{E} d\vec{l}) \quad (6)$$

Кулоновская сила, действующая на заряд в электростатическом поле, является консервативной силой. Поэтому работа сил электростатического поля по перемещению заряда не зависит от

траектории движения и определяется только начальным и конечным положениями заряда.

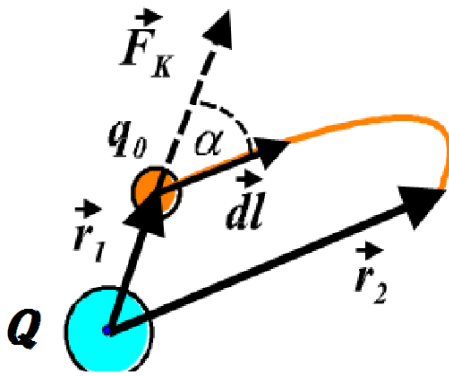


Рис. 2

Пусть электростатическое поле создается точечным зарядом  $+Q$  (рис.2). Напряженность поля точечного заряда равна  $\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}$ . Тогда, вычисляя по формуле (6), работа сил электростатического поля по перемещению заряда  $q_0$  из точки 1 в точку 2 будет

$$A_{12} = \frac{q_0 Q}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (7)$$

Работа сил электростатического поля при перемещении заряда по замкнутому пути равна нулю

$$q_0 \oint_L (\vec{E} d\vec{l}) = 0 \quad \text{или} \quad \text{т.к. } q_0 \neq 0, \quad \text{то} \quad \oint_L (\vec{E} d\vec{l}) = 0$$

**Циркуляция вектора напряженности** – это интеграл от вектора  $\vec{E}$  по замкнутому контуру  $L$

$$\oint_L (\vec{E} d\vec{l}) \quad (8)$$

Циркуляция вектора напряженности ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО поля вдоль любого замкнутого контура равна нулю  $\oint_L (\vec{E} d\vec{l}) = 0$ .

Силовое поле, циркуляция которого равна нулю, называется **потенциальным полем**.

**Потенциальная энергия заряда**

Электростатические силы - это консервативные силы. Работа консервативных сил совершается за счет убыли потенциальной энергии

$$A_{12} = -\Delta W_p = -(W_{p2} - W_{p1}) = W_{p1} - W_{p2}. \quad (9)$$

Если заряд  $q_0$  находится в поле точечного заряда  $+Q$  на расстоянии  $r$  от него, то он будет обладать потенциальной энергией (см. (7) и (9))

$$W_p = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{q_0 Q}{r}. \quad (10)$$

♦ **Потенциал**  $\varphi$ , В (вольт) - скалярная величина, равная отношению потенциальной энергии, которой обладает пробный заряд, помещенный в данную точку поля, к величине этого заряда

$$\varphi = \frac{W_p}{q_{пр}}. \quad (11)$$

Потенциал численно равен потенциальной ЭНЕРГИИ, которой обладает единичный положительный заряд в данной точке поля. Поэтому потенциал - это *энергетическая характеристика поля*.

*Потенциал поля, созданного точечным зарядом Q:*

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{Q}{r}, \quad (12)$$

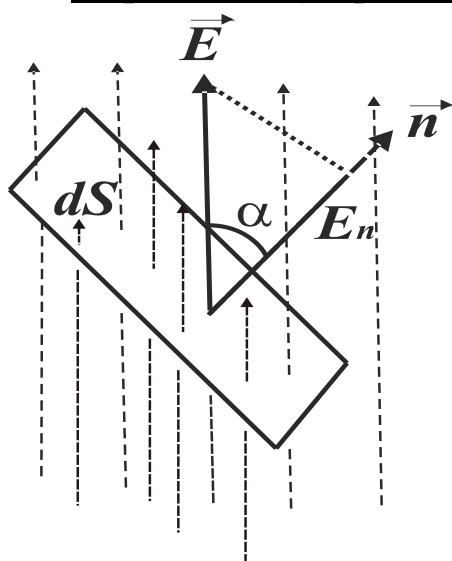
где  $r$  - расстояние от заряда  $Q$  до точки, в которой определяется потенциал поля.

Работа сил электростатического поля по перемещению заряда  $q_0$  из точки 1 в точку 2 (формула 9) может быть выражена через *разность потенциалов* ( $\varphi_1 - \varphi_2$ ):

$$A = q_0(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (13)$$

Поверхность, все точки которой имеют одинаковый потенциал, называется *эквипотенциальной поверхностью*.

♦ **Принцип суперпозиции потенциалов:** Если электрическое



поле создается системой зарядов  $q_1, q_2, \dots, q_n$ , то потенциал результирующего поля равен алгебраической сумме потенциалов полей, которые создает каждый заряд в отдельности.

♦ **Поток вектора напряженности электрического поля**  $\Phi_E$ , В·м

Элементарным потоком вектора напряженности электрического поля через элементарную площадку  $dS$  называется произведение модуля вектора напряженности  $\vec{E}$  на площадь элементарной поверхности и на косинус угла между нормалью к поверхности  $\vec{n}$

Рис. 3.

и направлением вектора  $\vec{E}$  (рис.3)

$$d\Phi_E = (\vec{E} d\vec{S}) = E dS \cos(\alpha) = E_n dS \quad (14)$$

где  $E_n = E \cos(\alpha)$  – проекция вектора  $\vec{E}$  на нормаль  $\vec{n}$  к площадке  $dS$ .

**Поток вектора напряженности электрического поля  $\vec{E}$  через произвольную поверхность  $S$**  равен алгебраической сумме элементарных потоков и пропорционален числу силовых линий, пронизывающих данную поверхность:

$$\Phi_E = \int_S (\vec{E} d\vec{S}) = \int_S E_n dS = \int_S E \cos(\alpha) dS \quad (15)$$

#### ♦ Теорема Гаусса

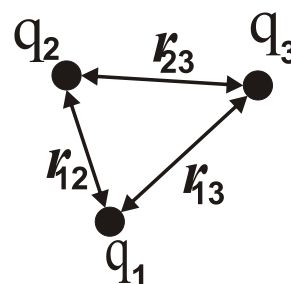
**Поток вектора напряженности электрического поля в вакууме через произвольную замкнутую поверхность равен алгебраической сумме зарядов, заключенных внутри этой поверхности, деленной на электрическую постоянную:**

$$\oint_S (\vec{E} d\vec{S}) = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{i=1}^n q_i = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (16)$$

Полный поток электростатического поля через любую замкнутую поверхность определяется только суммарным зарядом внутри этой поверхности и не зависит от того, как расположены заряды.

#### ЗАДАНИЕ ДЛЯ ДОПУСКА:

Дана система из трех точечных зарядов  $q_1, q_2$  и  $q_3$ . Заряды  $q_2$  и  $q_3$  – положительные, заряд  $q_1$  – отрицательный. Расстояния между зарядами  $r_{12}, r_{13}$  и  $r_{23}$ , соответственно (рис.).



1. Нарисуйте результирующую силу, действующую на каждый заряд.

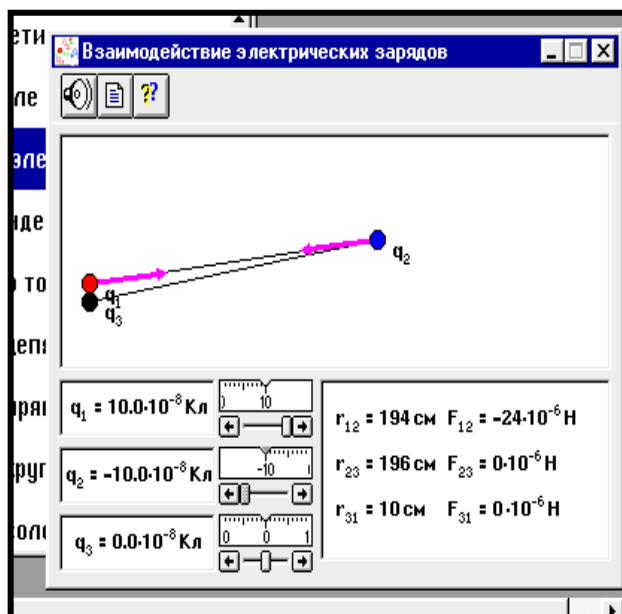
2. Рассчитайте величину результирующей силы, считая, что  $r_{12} = r_{13} = r_{23}$ .

3. Пусть заряды помещены внутрь замкнутой поверхности в виде куба. Рассчитайте поток поля данной системы зарядов через эту поверхность. Как будет зависеть поток от расположения зарядов внутри поверхности? Что произойдет с потоком, если изменить форму поверхности с кубической на сферическую?

#### МЕТОДИКА и ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

1. Запустите программу. Выберите «Электричество и магнетизм» и «Взаимодействие электрических зарядов».

2. Рассмотрите внимательно рисунок. Найдите регуляторы с движками, задающие значения зарядов. Попробуйте изменить расстояние между зарядами, зацепив маркером мыши заряд и удерживая левую кнопку мыши.



### 3. Протестируйте модель.

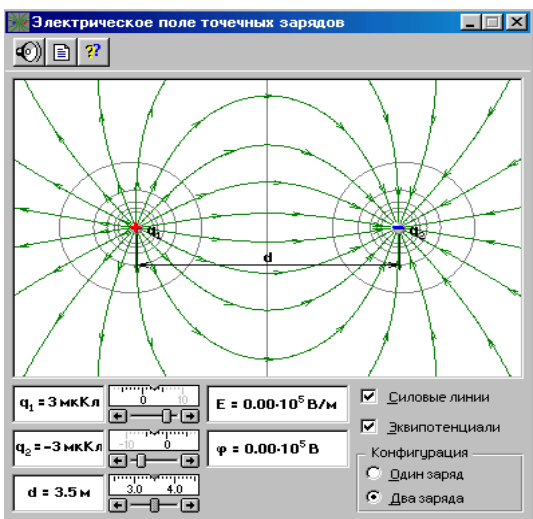
Для этого установите значения зарядов  $q_1$ ,  $q_2$  и  $q_3$  согласно номеру Вашего варианта из таблицы 6 дополнительного задания (в конце работы). Расстояния между зарядами установите произвольно. Рассчитайте по закону Кулона значения сил, действующих со стороны первого заряда на второй  $F_{12}$  и третий  $F_{13}$ , а также со стороны второго заряда на третий  $F_{23}$ . Все результаты расчета занесите в таблицу 1. Сравните

полученные Вами величины сил с измеренными значениями (на экране компьютера).

**ТАБЛИЦА 1. Тестирование модели.**

				Результаты расчета	Результаты измерения
$q_1, Кл$		$r_{12}, м$		$F_{12}, Н$	
$q_2, Кл$		$r_{13}, м$		$F_{13}, Н$	
$q_3, Кл$		$r_{23}, м$		$F_{23}, Н$	

4. Не закрывая окна «Взаимодействие электрических зарядов», откройте рядом окно «Электрическое поле точечного заряда».



в нижнем правом прямоугольнике «Конфигурация» щёлкните мышью на кнопке «Один заряд». Щёлкните мышью на кнопках «Силовые линии» и «Эквипотенциали». Меняя величину и знак заряда, проследите за изменением числа и направления силовых линий.

5. Зарисуйте силовые линии и эквипотенциальные поверхности для случаев положительного и отрицательного заряда в Ваш отчет.

6. Щёлкните мышью на кнопке «Два заряда». Меняя величины и знаки зарядов, проследите за изменением конфигурации силового поля. Посмотрите, как меняется поле при изменении расстояния между зарядами. Запишите наблюдения.

7. Зарисуйте силовые линии для случая двух одноименных зарядов и для случая двух противоположных зарядов.

Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.

Приступайте к измерениям.

### ЗАДАНИЕ 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОСТОЯННОЙ.

**ТАБЛИЦА 2. Установочные значения величины заряда  $q_1$  (два значения).**

Номер варианта	$q_1, \text{ нКл}$		Номер варианта	$q_1, \text{ нКл}$	
1	<b>40</b>	<b>-60</b>	9	<b>100</b>	<b>-20</b>
2	<b>20</b>	<b>-70</b>	10	<b>90</b>	<b>-30</b>
3	<b>30</b>	<b>-80</b>	11	<b>10</b>	<b>-80</b>
4	<b>10</b>	<b>-50</b>	12	<b>20</b>	<b>-50</b>
5	<b>50</b>	<b>-90</b>	13	<b>30</b>	<b>-70</b>
6	<b>60</b>	<b>-40</b>	14	<b>40</b>	<b>-10</b>
7	<b>70</b>	<b>-20</b>	15	<b>50</b>	<b>-100</b>
8	<b>80</b>	<b>-30</b>	16	<b>60</b>	<b>-90</b>

**ТАБЛИЦА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ (9 столбцов)**

	$1) q_1 = \text{--- нКл}; 2) q_1 = \text{--- нКл};$		$q_2 = \text{--- нКл};$	$q_3 = \text{--- нКл}.$
$r, \text{ см}$	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>...</b>	<b>100</b>
$1/r^2, \text{ м}^{-2}$				
$F_1, \text{ Н}$ (для первого значения $q_1$ )				
$F_2, \text{ Н}$ (для второго значения $q_1$ )				
$E_1, \text{ В/м}$				
$E_2, \text{ В/м}$				

8. Активизируйте окно «Взаимодействие электрических зарядов». Рассмотрим взаимодействие двух зарядов  $q_1$  и  $q_2$ . Заряд  $q_3$  исключим из взаимодействия, для чего следует установить его значение равным нулю и поместить его в левый нижний угол окна опыта.

9. Заряд  $q_1$  (он создает исследуемое поле) поместите в левый верхний угол окна опыта. Установите первое значение заряда  $q_1$ , соответствующее номеру Вашего варианта из таблицы 2.
10. Заряд  $q_2$  поместите рядом с  $q_1$  на расстоянии  $r = 20\text{ см}$  от него ( $r_{12}$  в окне опыта) и установите равным  $10^{-8}\text{ Кл}$ . Это - пробный заряд, с помощью которого будем исследовать поле заряда  $q_1$ . Запишите в соответствующую ячейку таблицы 3 величину силы  $F_1$  взаимодействия зарядов ( $F_{12}$  в окне опыта).
11. Увеличивайте расстояние между зарядами каждый раз на  $10\text{ см}$  и записывайте значение силы  $F_1$  в таблицу.
12. Установите второе значение заряда  $q_1$ , соответствующее номеру Вашего варианта из таблицы 2. Продолжите заполнение таблицы 3 – значения силы  $F_2$  для второго значения  $q_1$ .
13. Рассчитайте величину напряженности электростатического поля  $E_1$  и  $E_2$  для соответствующих значений заряда  $q_1$  и расстояний  $r$  по формуле 5.
14. Постройте на одном листе графики зависимостей напряженности поля точечного заряда  $E_1$  и  $E_2$  от квадрата обратного расстояния  $1/r^2$  между ними.
15. Из каждого графика по его наклону определите значение электрической постоянной  $\epsilon_0$ , используя формулу

$$\epsilon_0 = \frac{q_1}{4\pi} \frac{\Delta\left(\frac{1}{r^2}\right)}{\Delta(E)}$$

16. Сравните полученные значения с теоретическим значением электрической постоянной.. Сделайте вывод.

## **ЗАДАНИЕ 2. ИЗУЧЕНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ТЕОРЕМЫ ГАУССА.**

Поток напряженности электростатического поля через любую поверхность пропорционален числу силовых линий, пересекающих эту поверхность. Электростатическое поле в вакууме изотропное, т.е. одинаково по всем направлениям. Тогда количество силовых линий, пересекающих произвольную замкнутую поверхность, внутри которой находятся электрические заряды, будет пропорционально количеству силовых линий, пересекающих замкнутый контур, ограничивающий площадь сечения, в которой находятся электрические заряды этой замкнутой поверхности. При таком допущении реальное трёхмерное электростатическое поле можно привести в количественное соответствие с плоской компьютерной моделью, которая показана в окне опыта.



1. Активизируйте окно работы «Электрическое поле точечного заряда».

2. Рассчитайте поток  $\Phi_E$  вектора напряженности через произвольную замкнутую поверхность, внутри которой находится электрический заряд  $q = +1 \text{ мкКл}$ , т.е. для реального трёхмерного кулоновского поля. По теореме Остроградского-Гаусса имеем:

$$\Phi_E = \frac{q}{\epsilon_0} = \frac{1 \cdot 10^{-6}}{8,85 \cdot 10^{-12}} = 1,13 \cdot 10^5 \text{ (В} \cdot \text{м)}.$$

3. В окне опыта включите «Силовые линии» и установите конфигурацию «Один заряд». Установите значение  $q_1 = +1 \text{ мкКл}$ . Подсчитайте число силовых линий  $N$ , пересекающих рамку окна. Рассчитайте значение потока реального трёхмерного поля, которое соответствует одной силовой линии в плоской компьютерной модели

$$\Phi_1 = \frac{1,13 \cdot 10^5}{N} \text{ (В} \cdot \text{м)} = \underline{\hspace{2cm}}.$$

**ТАБЛИЦА 4. Установочные значения зарядов.**

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
<b>ОДИН ЗАРЯД</b>																
$q_1, \text{ мкКл}$	-5	-4	-3	-2	-1	-5	-4	-3	-2	-1	-5	-4	-3	-2	-1	-5
	2	3	5	4	5	4	2	4	-1	4	1	2	2	5	3	2
<b>ДВА ЗАРЯДА</b>																
$q_1, \text{ мкКл}$	5	-5	-5	5	3	5	4	-4	-3	-2	-4	-3	4	-5	5	3
	-3	2	-1	3	-2	-4	-3	5	5	4	3	5	-1	4	1	4
$q_2, \text{ мкКл}$	-3	1	2	-1	-4	-1	-2	1	1	1	5	5	-2	3	-2	-1
	2	-4	-3	2	5	-2	1	-3	-4	-5	-1	-2	3	-1	3	5
$d_1, \text{ м}$	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	2	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	2
$d_2, \text{ м}$	3	3.5	4	4.5	5	2.5	4	3	3	3.5	4	4.5	5	2.5	4	3
$d_3, \text{ м}$	4	4.5	5	2.5	3	3	2	4	4	4.5	5	2.5	3	3	2	4

4. Установите первое значение  $q_1$ , соответствующее номеру Вашего варианта из таблицы 4 для случая ОДИН ЗАРЯД.

5. Подсчитайте число силовых линий **выходящих**  $N_+$  и **входящих**  $N_-$  через границы прямоугольной рамки окна опыта. При этом внимательно смотрите за направлением стрелок на силовых линиях поля. Запишите эти данные в таблицу 5 и рассчитайте полный поток через контур по формуле

$$\Phi_E = \Phi_1 (N_+ - N_-)$$

**ТАБЛИЦА 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ.**

ОДИН ЗАРЯД								
	1		2					
$q_1, \text{ мкКл}$								
$N_+$								
$N_-$								
$N_+ - N_-$								
$\Phi_E = \Phi_I(N_+ - N_-),$ $\text{ В} \cdot \text{ м}$								
ДВА ЗАРЯДА								
	$d_1 =$				$d_2 =$		$d_3 =$	
	1	2	3	4	5	6	7	8
$q_1, \text{ мкКл}$								
$q_2, \text{ мкКл}$								
$q = q_1 + q_2,$ $\text{ мкКл}$								
$N_+$								
$N_-$								
$N_+ - N_-$								
$\Phi_E = \Phi_I(N_+ - N_-),$ $\text{ В} \cdot \text{ м}$								

6. Установите второе значение  $q_1$  Вашего варианта. для случая ОДИН ЗАРЯД.

7. Подсчитайте число выходящих и входящих силовых линий согласно пункта 5, рассчитайте полный поток и запишите результаты в таблицу.

8. Установите конфигурацию «Два заряда». Установите первые значения зарядов  $q_1$  и  $q_2$ , соответствующие Вашему варианту для случая ДВА ЗАРЯДА. Установите расстояние между зарядами  $d_1$  из таблицы 4.

9. Подсчитайте число выходящих и входящих силовых линий согласно пункта 5, рассчитайте полный поток и заполните столбец 1 таблицы 5.

10. Установите другую комбинацию зарядов  $q_1$  и  $q_2$  Вашего варианта для случая ДВА ЗАРЯДА. Расстояние между зарядами не меняйте! Повторите пункт 5. Заполните столбец 2 таблицы 5. Аналогично заполните столбцы 3 и 4 таблицы 5 для других комбинаций зарядов  $q_1$  и  $q_2$ .

11. Установите расстояние  $d_2$  между зарядами. Установите любую комбинацию зарядов  $q_1$  и  $q_2$ , соответствующих Вашему варианту для случая ДВА ЗАРЯДА.

12. Посчитайте поток по пункту 5. Занесите результат в столбец 5. Аналогично заполните столбец 6 таблицы 5 для другой комбинации зарядов.

13. Установите расстояние между зарядами  $d_3$ . Посчитайте поток для любых двух комбинации зарядов ( как в п. 11 и 12). Занесите результаты в столбцы 7 и 8.

14. Постройте по данным таблицы 5 график зависимости потока вектора напряжённости  $\Phi_E$  от величины заряда  $q$ , заключенного внутри замкнутой поверхности.

17. Определите по наклону графика значение электрической постоянной  $\epsilon_0$ , используя формулу

$$\epsilon_0 = \frac{\Delta(q)}{\Delta(\Phi_E)}$$

15. Сделайте вывод: а) как зависит поток вектора напряженности от величины заряда внутри замкнутой поверхности; б) как зависит поток вектора напряженности от распределения заряда внутри замкнутой поверхности.

### **Письменно ответьте на следующие вопросы:**

1. Д а й т е о п р е д е л е н и е электрическому заряду. Перечислите основные свойства заряда.

2. Запишите закон Кулона. Как изменится сила взаимодействия двух точечных зарядов, если расстояние уменьшить вдвое, а величину каждого заряда увеличить в четыре раза?

3. Какое поле называется электростатическим? Что является его источником?

4. Дайте определение напряженности поля точечного заряда.

5. Сформулируйте принцип суперпозиции для электрических полей. В каких случаях необходимо применять принцип суперпозиции?

6. К а к о е п о л е н а з ы в а е т с я потенциалным? Запишите условие потенциальности поля.

7. Ч т о т а к о е с и л о в ы е л и н и и напряженности поля и как они направлены?

8. Запишите выражения для определения потока вектора напряженности электростатического поля: а) через элементарную площадку  $dS$ ; б) через площадку  $S$ ; в) через замкнутую поверхность  $S$ .
9. Сформулируйте теорему Гаусса для вектора  $\vec{E}$  электростатического поля в вакууме. Между какими величинами дает связь теорема Гаусса?
10. Дайте определение потенциала электрического поля. Чему равен потенциал поля точечного заряда?
11. Как выражается работа по перемещению заряда в электрическом поле: а) через напряженность поля; б) через разность потенциалов.
12. Какие поверхности называются эквипотенциальными? Чему равна работа по перемещению заряда вдоль эквипотенциальной поверхности?
13. Каково взаимное расположение эквипотенциальных поверхностей и силовых линий электрического поля? Почему?
14. Запишите закон Кулона. Нарисуйте зависимость  $F(q)$  и  $F(r)$ . Как изменится сила взаимодействия двух точечных зарядов, если расстояние уменьшить вдвое, а величину каждого заряда увеличить в четыре раза?
15. Запишите закон Кулона в полевой форме.
16. Запишите выражения для определения потока вектора напряженности электростатического поля:  
а) через элементарную площадку  $dS$ ; б) через площадку  $S$ ; в) через замкнутую поверхность  $S$ .
17. Запишите теорему Гаусса для вектора  $\vec{E}$  электростатического поля в вакууме. Между какими величинами дает связь теорема Гаусса?
18. В каких случаях поток вектора  $E$  через плоскую поверхность равен нулю? В каких случаях поток вектора  $E$  через замкнутую поверхность равен нулю?
19. Что такое циркуляция? Запишите условие потенциальности поля.
20. Дайте определение потенциала электрического поля. Чему равен потенциал поля точечного заряда?
21. Какие поверхности называются эквипотенциальными? Чему равна работа по перемещению заряда вдоль эквипотенциальной поверхности?
22. Какова связь между потенциалом и напряженностью электрического поля? Выведите ее.
23. Каково взаимное расположение эквипотенциальных поверхностей и силовых линий электрического поля?

### **ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ:**

В точке с координатами  $X_1=0, Y_1=0$  находится точечный заряд  $q_1$ . В точке с координатами  $X_2$  и  $Y_2=0$  находится точечный заряд  $q_2$ . Заряд  $q_3$  помещается в точку поля с координатами  $X_3, Y_3$ . Система зарядов находится в воздухе.

Числовые значения  $X_2, X_3, Y_3, q_1, q_2$  и  $q_3$  задаются для каждого варианта (таблица 6):

**ТАБЛИЦА 6. Числовые значения величин  $X_2, X_3, Y_3, q_1, q_2$  и  $q_3$ .**

<b>ВАРИАНТ</b>	<b><math>X_2, см</math></b>	<b><math>X_3, см</math></b>	<b><math>Y_3, см</math></b>	<b><math>q_1, нКл</math></b>	<b><math>q_2, нКл</math></b>	<b><math>q_3, нКл</math></b>
1	60	75	80	-10	20	30
2	65	80	60	-20	10	40
3	70	85	70	-30	20	10
4	75	90	120	-40	50	30
5	80	95	110	-30	60	20
6	85	100	130	-40	70	20
7	90	105	75	-50	60	30
8	95	110	80	-60	70	40
9	100	120	60	-70	100	50
10	105	60	90	-60	90	40
11	110	65	85	-80	50	70
12	115	70	80	-90	80	50
13	120	75	70	-100	70	60
14	125	80	65	-80	70	100
15	130	85	60	-90	100	50
16	135	90	55	-100	50	60

**Определите: а) В ОТСУТСТВИЕ ЗАРЯДА  $q_3$ :**

- 1) Определить силу Кулона  $\vec{F}_{12}$ , действующую на заряд  $q_2$  со стороны заряда  $q_1$  и указать на рисунке ее направление;
- 2) Определить потенциальную энергию системы зарядов  $q_1$  и  $q_2$ ;
- 3) Определить напряженность поля  $\vec{E}_3$  в исследуемой точке поля  $X_3, Y_3$ , и обозначить на рисунке ее направление;
- 4) Определить потенциал поля  $\varphi_3$  в исследуемой точке поля  $X_3, Y_3$ .

**б) ПОМЕСТИТЕ ЗАРЯД  $q_3$  В ИССЛЕДУЕМУЮ ТОЧКУ ПОЛЯ  $X_3, Y_3$ .**

- 5) Определить силу Кулона  $\vec{F}_3$ , действующую на заряд  $q_3$  со стороны зарядов  $q_1$  и  $q_2$ . Обозначить на рисунке ее направление;
- 6) Определить потенциальную энергию заряда  $q_3$  в поле системы зарядов  $q_1$  и  $q_2$ .

◆ **Дополнительная задача:**

1. Определить заряд, емкость и потенциал Земли, считая ее шаром радиусом  $6 \cdot 10^3$  км и зная, что напряженность поля около поверхности равна  $100$  В/м.

## ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННОЙ ЧАСТИЦЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Запустите программу «Открытая физика». Выберите «Электричество и магнетизм» и «Движение заряда в электрическом поле».

### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Экспериментальное исследование движения точечного заряда в однородном электрическом поле и определение величины удельного заряда частицы.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Движение заряженных частиц в электрическом поле широко используется в современных электронных приборах, в частности, в электронно-лучевых трубках с электростатической системой отклонения электронного пучка (осциллографы) (рис.1).

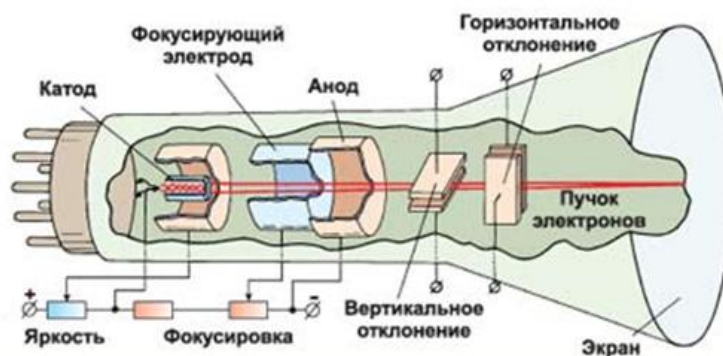


Рис. 1.

Электрическое поле действует на движущуюся в нем заряженную частицу с определенной силой. Поэтому заряженная частица, влетевшая в электрическое поле, отклоняется от своего первоначального направления движения, если это направление не совпадает с направлением поля. Если частица влетает вдоль направления поля, то электрическое поле только ускоряет (или замедляет) движущуюся частицу.

Силовой характеристикой поля является напряженность - векторная величина, численно равная силе  $\vec{F}_{ЭЛ}$ , действующей на единичный положительный точечный заряд:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_{ЭЛ}}{q} \quad (1)$$

Если задана напряженность электрического поля, то силу, действующую на заряд, можно определить по формуле:

$$\vec{F}_{эл} = q \vec{E} \quad (2)$$

Поле называется однородным, если его напряженность во всех точках одинакова как по величине, так и по направлению.

Рассмотрим движение заряженной частицы в электрическом поле на примере движения электрона в поле плоского конденсатора (рис.2).

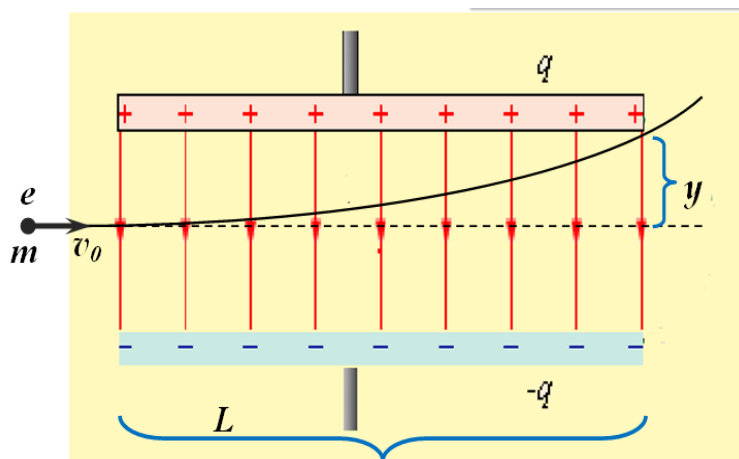


Рис. 2.

Пусть электрон, имеющий заряд  $e$  и массу  $m$ , влетает со скоростью  $v_0$  в электрическое поле плоского конденсатора длиной  $L$  перпендикулярно полю, то есть параллельно пластинам. За пределами конденсатора напряженность поля равна нулю. Электрическое поле сосредоточено между пластинами конденсатора, причем поле – однородное ( $\vec{E} = const$ ). Для такого поля можно записать:

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d} = \frac{U}{d} \quad (3)$$

где  $U$  – напряжение, приложенное к пластинам конденсатора;  $d$  – расстояние между пластинами. Электрон при движении будет смещаться к положительно заряженной пластине (рис.2). Пролетев по криволинейной траектории, он вылетит из конденсатора, отклонившись от первоначального направления на отрезок  $y$ .

Рассмотрим движение электрона относительно неподвижной системы координат  $xOy$  (рис.3). Относительно этой системы отсчета движение электрона – криволинейное (траектория – парабола). Вдоль оси  $Ox$  электрон движется с постоянной скоростью  $v_x = v_0$ ; вдоль оси  $Oy$  – движение равноускоренное с ускорением  $a$ .



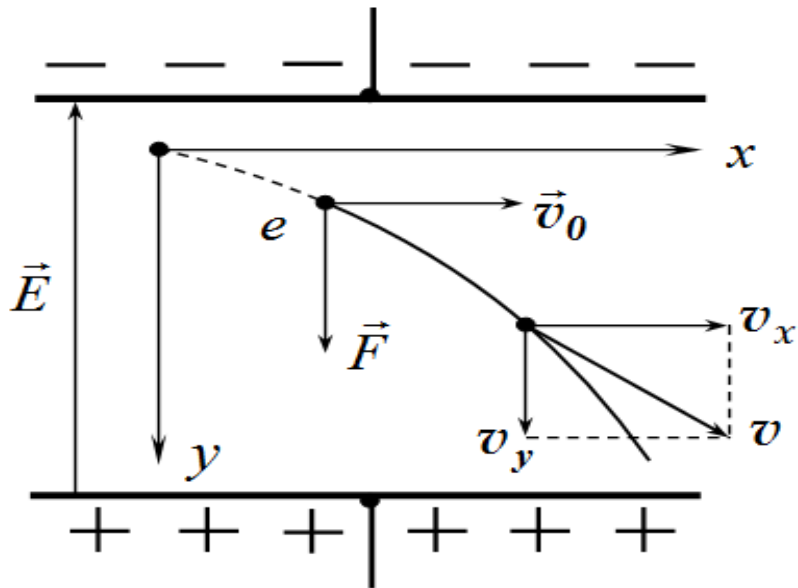


Рис. 3.

Сила, действующая на заряженную частицу в однородном поле, везде одинакова, поэтому ускорение частицы (которое можно определить по второму закону Ньютона) тоже меняться не будет. Сила  $\vec{F}$ , действующая на электрон со стороны поля, имеет направление противоположное вектору напряженности  $\vec{E}$ . Выразим силу через характеристики поля и заряд электрона:

$$F_{эл} = e \cdot E = \frac{e \cdot U}{d}. \quad (4)$$

Ускорение электрона определим по второму закону Ньютона  $\vec{F} = m\vec{a}$ :

$$a = \frac{F_{эл}}{m} = \frac{e}{m} E = \frac{e \cdot U}{m \cdot d} = const \quad (5)$$

Смещение электрона вдоль  $Oy$  равно

$$y = \frac{at^2}{2} \quad (6)$$

где  $t$  – время движения электрона. За это время  $t$  электрон по горизонтали проходит расстояние, равное длине пластин конденсатора  $L$ , со скоростью  $v_x = v_{0x} = const$ . Откуда

$$t = \frac{L}{v_{0x}} \quad (7)$$

Окончательно получим, что  $y$  - смещение частицы по вертикали равно:

$$y = \frac{eU}{2md} \cdot \frac{L^2}{v_{0x}^2} = \frac{1}{2} \frac{e}{m} E \cdot \frac{L^2}{v_{0x}^2} \quad (8)$$

Скорость движения электрона в любой момент времени равна векторной сумме горизонтальной и вертикальной составляющих скорости:

$$\vec{v} = \vec{v}_x + \vec{v}_y \quad (9)$$

Величина скорости определяется по формуле:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}, \quad (10)$$

где  $v_y = v_{0y} + at$ . Поскольку  $v_{0y} = 0$  (из условия задачи),

то  $v_y = at$ .

Следовательно,  $v_y$  - вертикальная компонента скорости в момент времени, когда частица вылетает из конденсатора, равна:

$$v_y = at = \frac{e}{m} E \cdot \frac{L}{v_{0x}} \quad (11)$$

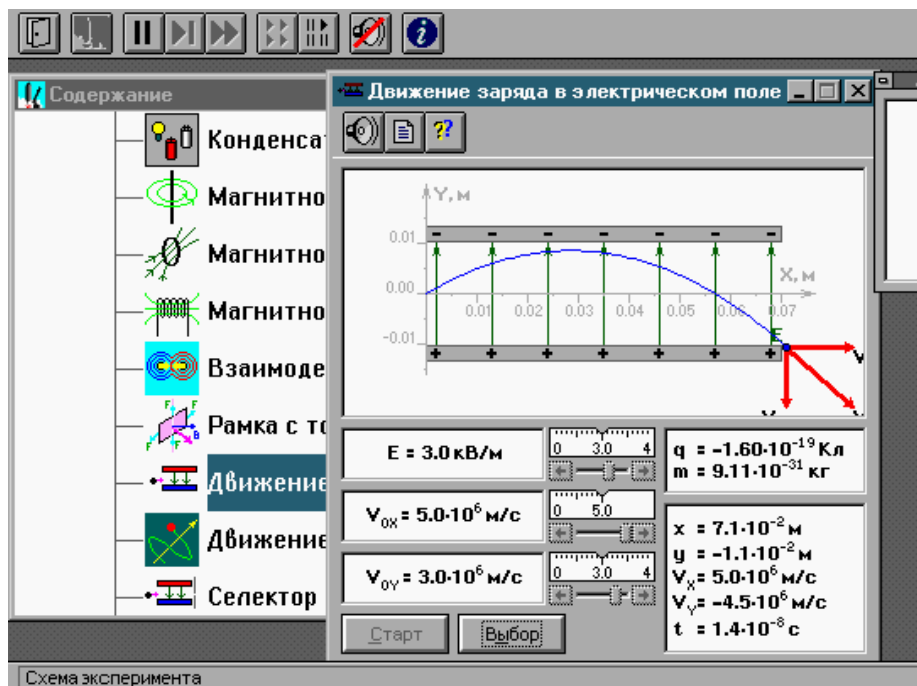
### **ЗАДАНИЕ ДЛЯ ДОПУСКА**

**Решите задачу.** Электрон влетает в середину плоского воздушного конденсатора параллельно его пластинам со скоростью  $V_{0x} = 5$  Мм/с. Расстояние между пластинами  $d = 2$  см, разность потенциалов  $U = 10$  В. Найти отклонение электрона, вызванное полем конденсатора, если длина его пластины  $L = 7$  см.

### **МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ**

1. Запустите программу «Открытая физика». Выберите «Электричество и магнетизм» и «Движение заряда в электрическом поле». Внимательно рассмотрите картинку в средней части монитора.

2. Найдите регуляторы с движками, задающие напряженность поля  $E$ , горизонтальную составляющую начальной скорости  $V_{0x}$  и вертикальную составляющую начальной скорости  $V_{0y}$ .



3. Нажмите мышью кнопку «Выбор». Установите с помощью движков регуляторов: напряженность поля  $E = 3$  кВ/м,  $V_{0x} = 2 \cdot 10^6$  м/с,  $V_{0y} = 2 \cdot 10^6$  м/с. Нажав кнопку «Старт», наблюдайте на экране движение частицы. Зарисуйте поле эксперимента и траекторию движения частицы. Увеличивайте вертикальную составляющую скорости  $V_{0y}$  на  $0.2 \cdot 10^6$  м/с и наблюдайте на экране движение частицы.

4. Вернитесь к исходным значениям величин. Увеличивайте горизонтальную составляющую скорости  $V_{0x}$  на  $0.2 \cdot 10^6$  м/с и наблюдайте на экране движение частицы. Заметьте, когда частица вылетит из конденсатора. Запишите значения параметров движения частицы в момент вылета из конденсатора. Зарисуйте траекторию движения частицы.

**Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений. Приступайте к измерениям.**

**ТАБЛИЦА 1. Установочные значения напряженности поля.**

<b>Вариант</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
$E$ [В/м]	100	200	300	400	-100	-200	-300	-400
<b>Вариант</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>
$E$ [В/м]	500	600	700	800	-500	-600	-700	-800

5. Нажмите мышью кнопку «Выбор». Установите с помощью движков регуляторов числовое значение напряженности поля  $E$  из таблицы 1 для Вашего варианта и значения  $V_{0x}=0.1 \cdot 10^6$  м/с и  $V_{0y}=0$ .
6. Нажав кнопку «Старт», наблюдайте движение частицы. Запишите числовые значения параметров движения частицы в таблицу 2.
7. Увеличивая  $V_{0x}$  каждый раз на  $0.1 \cdot 10^6$  м/с, записывайте значения параметров движения частицы в таблицу 2. Подберите минимальное значение скорости, при котором частица вылетает из конденсатора.
8. Проведите измерения параметров движения частицы в момент вылета из конденсатора. Запишите значение длины пластин конденсатора  $L$ .

## ТАБЛИЦА 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

ПРИ  $E = \underline{\hspace{1cm}}$  В/м,  $L = \underline{\hspace{1cm}}$  м.

$V_{0x}$ [Мм/с]											
$X$ [мм]											
$Y$ [мм]											
$t_{дв}$ [нс]											
$V_x$ [Мм/с]											
$V_y$ [Мм/с]											
$1/V_{0x}$ [с/Мм]											
$(1/V_{0x})^2$ [с <sup>2</sup> /Мм <sup>2</sup> ]											

9. Рассчитайте значения обратной начальной скорости ( $1/V_{0x}$ ) и квадрата обратной начальной скорости  $(1/V_{0x})^2$ . Запишите их в таблицу 2.
10. Постройте на отдельных листах миллиметровой бумаги графики экспериментальных зависимостей
  - а) вертикального смещения на вылете из конденсатора  $Y$  от квадрата обратной начальной скорости  $(1/V_{0x})^2$ ,
  - б) вертикальной составляющей скорости  $V_y$  на вылете из конденсатора от обратной начальной скорости  $(1/V_{0x})$ .
11. Для каждого графика определите по его наклону экспериментальное значение удельного заряда частицы, используя формулы

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

$$\frac{q}{m} = \frac{1}{EL} \frac{\Delta(V_Y)}{\Delta\left(\frac{1}{V_{0X}}\right)} \quad (\text{для второго графика}).$$

12. Рассчитайте среднее значение экспериментально полученного удельного заряда частицы.

13. Рассчитайте теоретическое значение удельного заряда электрона  $q_e/m$ .

14. Запишите ответ, сравните полученное Вами значение с теоретическим. Сформулируйте выводы по ответу и графикам.

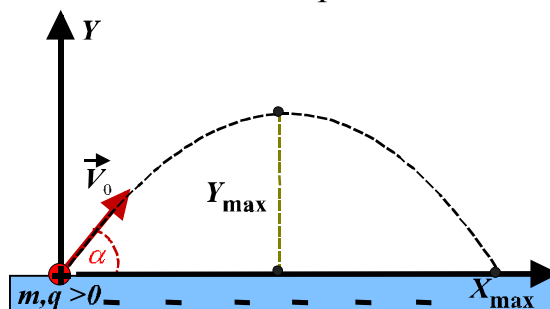
**Заряд электрона**  $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл,

**масса электрона**  $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг.

### Письменно ответьте на следующие вопросы:

1. Напишите закон Кулона для силы взаимодействия двух неподвижных зарядов.
2. Дайте определение электростатического (электрического) поля.
3. Дайте определение напряженности электрического поля.
4. Напишите формулу, определяющую электрическую силу, действующую на точечный заряд в электрическом поле с заданной напряженностью.
5. Выведите формулу для напряженности электрического поля точечного заряда.
6. Сформулируйте принцип суперпозиции для электрического поля
7. Какое поле называется однородным?
8. Что такое конденсатор?
9. Какое поле существует между пластинами плоского конденсатора?
10. С помощью теоремы Остроградского-Гаусса выведите формулу для напряженности поля бесконечной однородно заряженной плоскости; поля двух пластин; поля двух заряженных пластин.
11. Какую форму имеет траектория движения электрона между пластинами плоского конденсатора?
12. Выведите формулу смещения по вертикали при движении заряженной частицы в поле конденсатора.
13. Что такое удельный заряд частицы?

**ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ.** В отсутствии силы тяжести частица массой  $m = 0,1$  кг и зарядом  $q > 0$  влетает в однородное поле равномерно заряженной горизонтальной плоскости. Скорость  $\vec{V}_0$  частицы составляет с плоскостью угол  $\alpha = 30^\circ$ , плотность заряда плоскости  $\sigma = -1,77 \cdot 10^{-6}$  Кл/м<sup>2</sup>. Система зарядов находится в вакууме,  $\epsilon = 1$ .



**ТАБЛИЦА 6. Числовые значения  $q$  и  $V_0$ :**

<b>Вариант</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$q (\cdot 10^{-7} \text{ Кл}) =$	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4
$V_0 (\text{м/с}) =$	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0	4,1	4,2	4,3	4,4
<b>Вариант</b>	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$q (\cdot 10^{-7} \text{ Кл}) =$	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0	4,1	4,2	4,3	4,4
$V_0 (\text{м/с}) =$	5,0	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6	5,7	5,8	5,9	6,0	6,1	6,2	6,3	6,4

**ОПРЕДЕЛИТЬ:**

- 1) ускорение  $a$  и тип движения частицы. Обозначить ускорение на рисунке в произвольном масштабе.
- 2) кинетическую  $K_0$ , потенциальную  $\Pi_0$  и полную  $W_0$  энергию частицы в начальный момент времени  $t_0 = 0$ .
- 3)  $t_{\max}$  – время полета частицы.
- 4)  $X_{\max}$  – максимальную дальность полета частицы.
- 5)  $Y_{\max}$  – максимальную высоту подъема частицы.
- 6) энергии  $K$ ,  $\Pi$  и  $W$  частицы в высшей точке траектории.

◆ **Дополнительные задачи.**

1. Электрическое поле образовано бесконечной плоскостью, заряженной с поверхностной плотностью  $1,40$  мкКл/м<sup>2</sup>, и двумя точечными зарядами  $20$  и  $40$  нКл. Заряды расположены на одной прямой параллельной плоскости, на расстоянии  $160$  мм друг от друга. Найти величину и направление напряженности электрического поля в середине этого отрезка.
2. Вдоль одной стороны квадрата со стороной  $100$  мм проходит бесконечно длинная заряженная нить с линейной плотностью заряда  $0,2$  мкКл/м, а в двух других вершинах находятся точечные заряды  $30$  и  $-40$  нКл. Найти величину и направление силы, действующей на точечный заряд  $10$  нКл, помещенный в центр квадрата.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.3

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МОЩНОСТИ И К.П.Д. ИСТОЧНИКА ПОСТОЯННОГО ТОКА ОТ ВНЕШНЕЙ НАГРУЗКИ

Запустите программу «Открытая физика». Выберите «Электричество и магнетизм» и «Цепи постоянного тока».

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследование зависимости мощности и к.п.д. источника постоянного тока от сопротивления внешней цепи.

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

♦ Электрический ток – упорядоченное движение заряженных частиц. За направление тока принимают направление движения ПОЛОЖИТЕЛЬНО заряженных частиц.

♦ Сила тока  $I$ , А (ампер) – скалярная величина, равная заряду, проходящему через поперечное сечение проводника в единицу времени:

$$I = \frac{dq}{dt}. \quad (1)$$

♦ Постоянный электрический ток – электрический ток, не меняющийся с течением времени:

$$I = \frac{q}{t}$$

♦ Плотность электрического тока,  $\vec{j}$ , А/м<sup>2</sup> – вектор, совпадающий с направлением электрического тока и численно равный току через единицу поверхности, перпендикулярной направлению тока

$$j = \frac{dI}{dS_{\perp}}. \quad (2)$$

Вектор плотности тока характеризует направление электрического тока в разных точках поверхности и распределение силы тока по этой поверхности. Сила тока через произвольную поверхность  $S$ :

$$I = \int_S \vec{j} d\vec{S} \quad (3)$$

♦ Электрическое сопротивление  $R$ , Ом – величина, характеризующая способность проводника препятствовать прохождению по нему электрического тока. Электрическое

сопротивление зависит от материала, из которого сделан проводник, и от его геометрических размеров:

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (4)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление (Ом·м) - зависит от свойств материала проводника;

$l$  – длина проводника;

$S$  – площадь поперечного сечения проводника.

♦ Условия существования электрического тока:

- свободные заряды, способные перемещаться под действием электрического поля,
- электрическое поле внутри проводника,
- источник энергии (тока), поддерживающий напряженность поля внутри проводника.

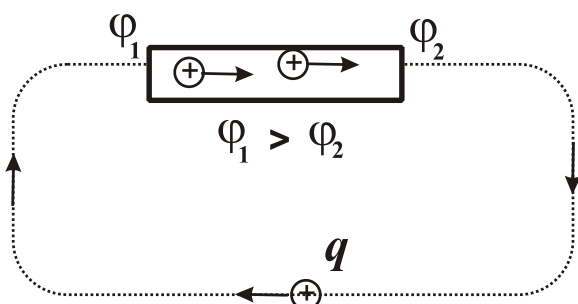


Рис. 1

Если в проводнике создать электрическое поле и затем не поддерживать его неизменным, то за счет перемещения зарядов поле исчезнет и ток прекратится. Для того, чтобы поддерживать ток неизменным, необходимо от конца проводника (рис.1) с меньшим потенциалом  $\varphi_2$  отводить приносимые туда

током заряды и переносить их к началу проводника с большим потенциалом  $\varphi_1$ . Необходимо создать круговорот зарядов, а для этого надо замкнуть цепь. Однако, **работа сил электростатического поля по замкнутому контуру равна нулю**. Электростатическое поле (кулоновская сила) не может создать движение заряда по замкнутому контуру проводника.

Это возможно лишь за счет работы сторонних сил неэлектростатической природы.

♦ Сторонние силы – силы неэлектростатического происхождения, действующие на заряды внутри источника тока. Под действием сторонних сил электрические заряды движутся внутри источника тока против сил электростатического поля.

♦ Электродвижущая сила (ЭДС)  $\mathcal{E}$ , В (вольт) – численно равна работе сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда внутри источника тока:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{СТ}}{q_0}. \quad (5)$$



♦ **Напряжение в электрической цепи  $U$ , В (вольт)** – это суммарная работа, совершаемая электростатическими и сторонними силами при перемещении единичного положительного заряда на данном участке цепи:

$$U_{12} = \frac{A_{\text{КУЛОН}}}{q_0} + \frac{A_{\text{СТ}}}{q_0} \Rightarrow$$

$$U_{12} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}_{12}. \quad (6)$$

При отсутствии сторонних сил ( $\mathcal{E} = 0$ ) напряжение равно разности потенциалов.

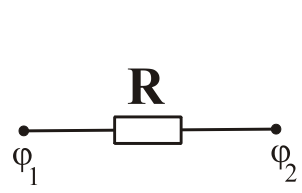
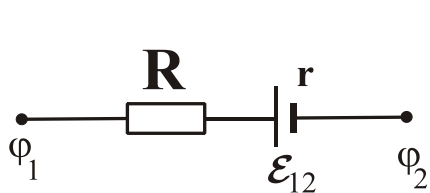
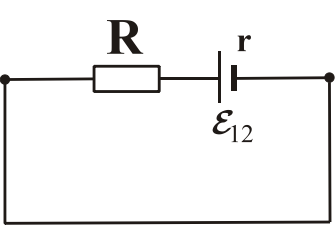
♦ **Однородный участок цепи** – участок цепи, не содержащий ЭДС (источник тока).

♦ **Неоднородный участок цепи** – участок цепи, содержащий ЭДС (источник тока).

♦ **Закон Ома:** Сила тока, протекающего в цепи, прямо пропорциональна напряжению в цепи и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи:

$$I = \frac{U}{R} \quad (7)$$

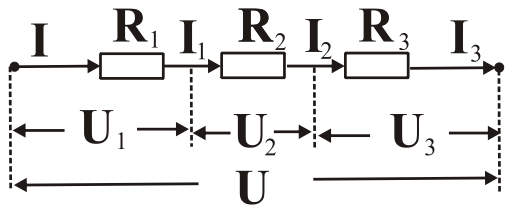
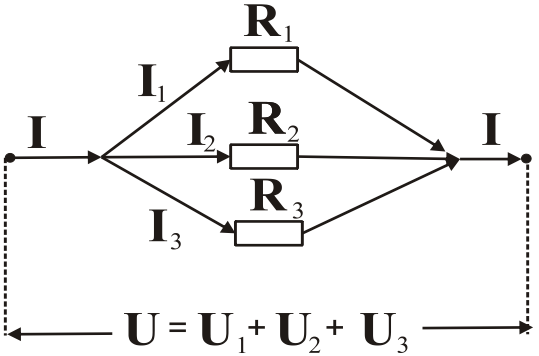
Полное сопротивление цепи складывается из внешнего сопротивления нагрузки  $R$  и внутреннего сопротивления источника тока  $r$ .

Закон Ома для ОДНОРОДНОГО УЧАСТКА ЦЕПИ	Закон Ома для НЕОДНОРОДНОГО УЧАСТКА ЦЕПИ	Закон Ома для ЗАМКНУТОЙ ЦЕПИ
		
$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R} \quad (7a)$	$I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}_{12}}{R + r} \quad (7б)$	$I = \frac{\mathcal{E}_{12}}{R + r} \quad (7в)$

♦ **Ток короткого замыкания** – это максимальный ток, который можно получить от данного источника, если внешнее сопротивление отсутствует. Он определяется ЭДС источника тока и его внутренним сопротивлением

$$I_{\text{к.з.}} = \frac{\mathcal{E}}{r}. \quad (8)$$

◆ Соединение проводников

Последовательное соединение проводников.	Параллельное соединение проводников
	
$I = I_1 = I_2 = I_3 = \dots$ $U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots$ $R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$	$I = I_1 + I_2 + I_3 \dots$ $U = U_1 = U_2 = U_3 = \dots$ $1/R = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 + \dots$

◆ Работа тока

Если по проводнику протекает электрический ток, то проводник нагревается. Нагревание проводника происходит за счет работы, совершаемой силами электрического поля по перемещению зарядов. Работа по перемещению заряда в однородном проводнике

$$dA = dq(\varphi_1 - \varphi_2) = dqU$$

За время  $dt$  через проводник проходит заряд  $dq = Idt$  и работа равна

$$dA = UI dt .$$

По закону Ома для однородного участка цепи  $U = R \cdot I$  и  $dA = I^2 R dt$  .

Работа за промежуток времени от  $t_1$  до  $t_2$

$$A = \int_{t_1}^{t_2} I^2 R dt \tag{9}$$

Если ток постоянный, то

$$A = I^2 R \Delta t . \tag{10}$$

♦ **Закон Джоуля – Ленца** – если ток проходит по неподвижному проводнику, то работа тока полностью преобразуется в тепловую энергию  $Q$  (т.е. идет на нагревание проводника)

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} I^2 R dt \quad (11)$$

Для постоянного тока:

$$Q = I^2 R \Delta t . \quad (12)$$

♦ **Мощность тока  $P$ , Вт** - работа тока за единицу времени:

$$P = \frac{\Delta A}{\Delta t} . \quad (13)$$

Мощность тока на участке цепи без ЭДС можно вычислить по любой из следующих формул:

$$P = UI , \quad P = \frac{U^2}{R} , \quad P = I^2 R . \quad (14)$$

Если в цепи имеется источник ЭДС , то

$$P_{пол} = UI \quad - \text{ полная мощность тока во внешнем участке цепи} \quad (15)$$

$$P_T = I^2 R \quad - \text{ мощность тока, затрачиваемая на тепловое действие (потеря мощности);} \quad (16)$$

$$P_{ист} = \mathcal{E} \cdot I \quad - \text{ мощность источника тока.} \quad (17)$$

♦ **Коэффициент полезного действия источника тока  $\eta$**  показывает, какая доля мощности, развиваемая источником тока, выделяется во внешней цепи:

$$\eta = \frac{P_{пол}}{P_{ист}} , \quad \text{или} \quad \eta = \frac{IU}{\mathcal{E}I} = \frac{U}{\mathcal{E}} . \quad (18)$$

По закону Ома  $U = I \cdot R$ , а  $\mathcal{E} = I \cdot (R+r)$  и

$$\eta = \frac{R}{R+r} . \quad (19)$$

КПД определяется отношением сопротивления внешнего участка цепи к общему сопротивлению цепи.

Мощность источника тока расходуется на внешнем участке цепи и на нагревание самого источника

$$\mathcal{E} \cdot I = U \cdot I + I^2 \cdot r ,$$

где  $P_2$  - потеря мощности на внутреннем сопротивлении источника.

$$P_2 = I^2 \cdot r \quad (20)$$

Отсюда следует, что полная мощность во внешней цепи

$$P_{пол} = \mathcal{E} \cdot I - I^2 \cdot r, \quad (21)$$

т.е.  $P_{пол}$  изменяется с изменением силы тока в цепи по параболическому закону и принимает нулевые значения при  $I = 0$  и

при  $I_{кз} = \frac{\mathcal{E}}{r}$ . Первое значение соответствует разомкнутой цепи, второе – короткому замыканию.

Для того, чтобы найти максимально возможную мощность во внешней цепи, нужно продифференцировать выражение (21) по току и приравнять производную к нулю:

$$\frac{dP_{пол}}{dI} = \mathcal{E} - 2Ir = 0$$

Мощность, выделяемая во внешней цепи, достигает своего максимального значения при силе тока

$$I = \frac{\mathcal{E}}{2r} = \frac{I_{кз}}{2} \quad (22)$$

и равна

$$P_{пол, max} = \frac{\mathcal{E}^2}{4r} \quad (23)$$

Зависимость КПД источника от силы тока в цепи

$$\eta = 1 - \frac{r}{\mathcal{E}} I \quad (25)$$

КПД достигает наибольшего значения  $\eta = 1$  в случае разомкнутой цепи ( $I = 0$ ), а затем уменьшается по линейному закону, обращаясь в нуль при коротком замыкании.

На рис. 2 показаны зависимости от тока в цепи напряжения в цепи, полной мощности во внешней цепи и КПД источника тока.

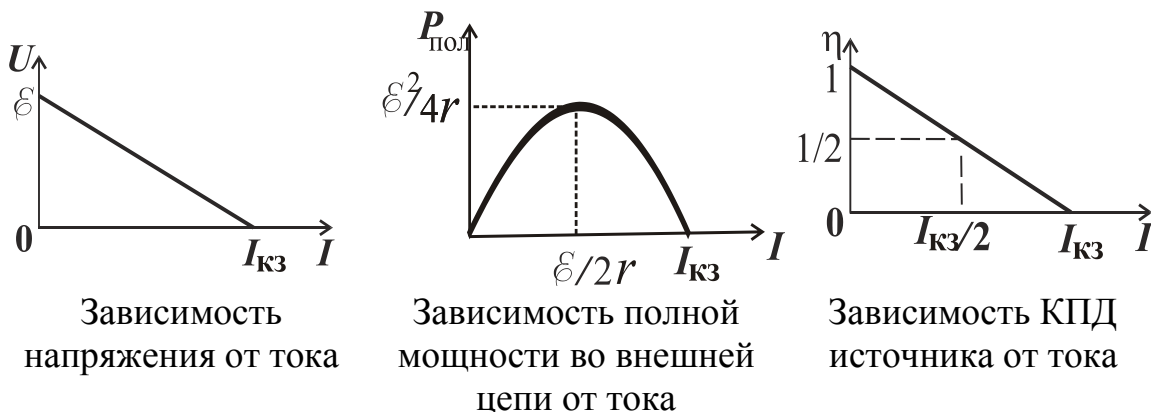


Рис. 2

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ ДОПУСКА

Решите задачи:

**Задача 1.** Три сопротивления **1 Ом**, **2 Ом** и **3 Ом** соединены параллельно. Сделайте рисунок. Найдите силу тока в каждом сопротивлении, если общая сила тока равна **11 А**.

**Задача 2.** Цепь состоит из трех последовательно соединенных проводников. Сопротивление первого проводника **4 Ом**, второго **6 Ом**, а напряжение на концах третьего проводника равно **4 В**. Общее напряжение на проводниках **24 В**. Сделайте рисунок. Найдите силу тока в цепи и напряжение на концах первого и второго проводников.

## МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

1. Запустите программу. Выберите «Электричество и магнетизм» и «Цепи постоянного тока».

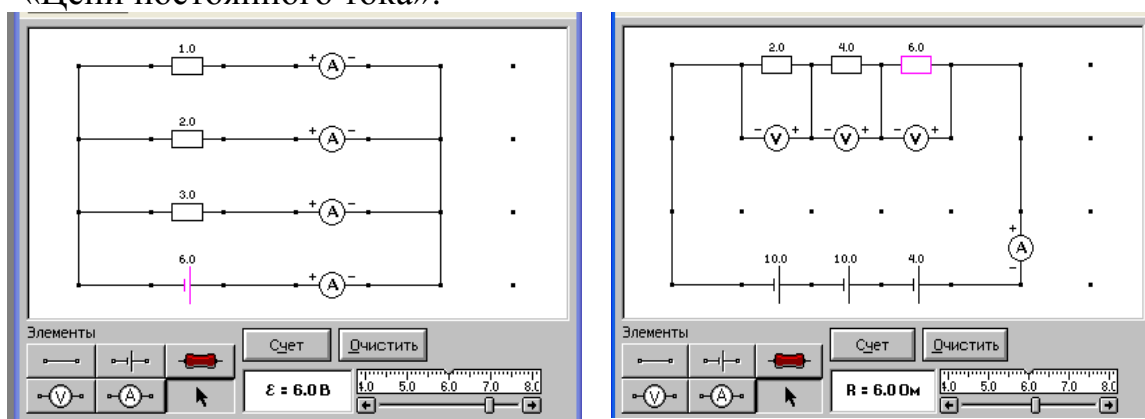

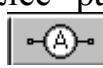


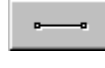
Схема к задаче 1


Схема к задаче 2

Рис. 3.

2. **Протестируйте модель.** Для этого соберите схемы, соответствующие задачам в задании для допуска (рис. 3). Сначала соберите цепь, показанную на рисунке 3 схема 1. Для этого щелкните левой кнопкой мыши над кнопкой  ЭДС в нижней части экрана. Переместите маркер мыши на рабочую часть экрана, где расположены точки. Щелкните левой кнопкой мыши в рабочей части экрана, где будет расположен источник ЭДС.

Далее разместите последовательно с источником амперметр (кнопка  там же). Затем расположите аналогичным образом резисторы нагрузки и другие амперметры.

Подключите соединительные провода. Для этого нажмите кнопку провода  внизу экрана, после чего переместите маркер мыши в рабочую зону схемы. Щелкайте левой кнопкой мыши в местах рабочей зоны экрана, где должны находиться соединительные провода.


3. Установите значения параметров для каждого элемента, заданные в условиях задач или полученные Вами при их решении. Для этого щелкните левой кнопкой мыши на кнопке со стрелкой . Затем щелкните на выбранном элементе. Подведите маркер мыши к движку появившегося регулятора, нажмите на левую кнопку мыши и, удерживая ее в нажатом состоянии, меняйте величину параметра до нужного значения. После того, как вы установили значения всех сопротивлений и ЭДС, нажмите кнопку «Счёт» и запишите показания электроизмерительных приборов. Заполните таблицу 1. Сравните величины силы токов и напряжений, полученных при компьютерном измерении, с расчетными значениями, полученными при решении задач.

**ТАБЛИЦА 1. Тестирование модели.**

<i>задача 1</i>			<i>задача 2</i>		
	Расчет	Измерение		Расчет	Измерение
$I_1$			$U_1$		
$I_2$			$U_2$		
$I_3$			$I$		

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

Приступайте к измерениям.

4. Соберите цепь, показанную на рисунке 4. Для этого разместите последовательно с источником тока резистор, изображающий его внутреннее сопротивление (нажав предварительно кнопку  в нижней части экрана).

5. Установите значения ЭДС и внутреннего сопротивления согласно Вашему варианту из таблицы 2.

**ТАБЛИЦА 2. Исходные параметры электрической цепи**

<i>Вариант</i>	1	2	3	4	5	6	7	8
$\mathcal{E}, B$	10,0	9,5	9,0	8,5	8,0	7,5	7,0	6,5
$r, Ом$	5,8	6,7	6,6	7,5	5,4	4,3	3,2	2,1
<i>Вариант</i>	9	10	11	12	13	14	15	16
$\mathcal{E}, B$	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5
$r, Ом$	3,0	4,6	4,8	5,0	5,5	5,9	4,1	3,5

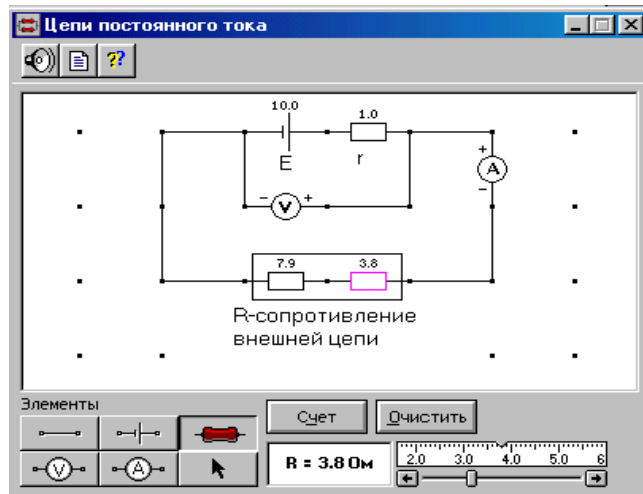


Рис. 4

6. Установите сопротивление внешней цепи **2 Ом**, нажмите кнопку «Счёт» и запишите показания амперметра и вольтметра в таблицу 3.
7. Последовательно увеличивайте с помощью движка регулятора сопротивление внешней цепи на **0,5-1 Ом** от **2 Ом** до **20 Ом** и, нажимая кнопку «Счёт», записывайте показания электроизмерительных приборов в таблицу 3.
8. Вычислите по формулам (15), (20), (17), (18)  $P_{пол}$ ,  $P_2$ ,  $P_{ист}$  и  $\eta$  для каждой пары показаний вольтметра и амперметра и запишите рассчитанные значения в таблицу 3.
9. Постройте графики зависимости  $U$ ,  $P_{пол}$ ,  $P_2$ ,  $P_{ист}$  и  $\eta$  от полного тока во внешней цепи  $I$ . Графики можно строить на одном листе миллиметровки цветными карандашами.

**ТАБЛИЦА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И РАСЧЁТОВ**

<b><math>R, \text{ Ом}</math></b>	2,0	2,5	3,0	...			20
<b><math>U, \text{ В}</math></b>							
<b><math>I, \text{ А}</math></b>							
<b><math>P_{пол}, \text{ Вт}</math></b>							
<b><math>P_2, \text{ Вт}</math></b>							
<b><math>P_{ист}, \text{ Вт}</math></b>							
<b><math>\eta</math></b>							

10. Продолжите построенные графики до пересечения с осями координат. Определите по графикам величину ЭДС, тока короткого замыкания и внутреннее сопротивление источника. Сравните полученные данные с Вашими исходными значениями ЭДС и внутреннего сопротивления.

11. Определите по графикам, при каком значении внешнего сопротивления  $R$  полная мощность во внешней цепи  $P_{пол}$  максимальна. Определите, чему равно при этом КПД.
12. Сделайте выводы.

### Письменно ответьте на следующие вопросы:

1. Что называется электрическим током? Постоянным электрическим током?
2. Как направлен электрический ток?
3. Дайте определения силы тока и плотности тока. В каких единицах они измеряются?
4. Что характеризуют электропроводность и сопротивление проводника? Как они связаны между собой? В каких единицах измеряются?
5. Как зависит сопротивление проводника от его размеров, формы и материала?
6. Что такое удельное сопротивление? В каких единицах оно измеряется?
7. Как рассчитать сопротивление участка цепи при последовательном и параллельном соединении проводников?
8. Сформулируйте условия существования тока в цепи.
9. Какие силы называются сторонними?
10. Что такое электродвижущая сила источника?
11. Что называется напряжением на участке цепи?
12. Какой участок цепи называется однородным? Неоднородным?
13. Закон Ома для однородного и неоднородного участка цепи.
14. Сформулируйте закон Ома для замкнутой цепи.
15. Что называется током короткого замыкания?
16. Как рассчитать работу постоянного тока? Закон Джоуля - Ленца.
17. Что такое мощность тока? По каким формулам можно рассчитать мощность тока на однородном участке цепи?
18. Что такое мощность источника тока? На что она расходуется?
19. Что определяет КПД источника тока?

### ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ.

Рассчитать участок цепи, представленный на рисунке 5, если  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = R$ . Числовые значения  $U$  и  $R$  заданы в таблице 4 для каждого варианта.

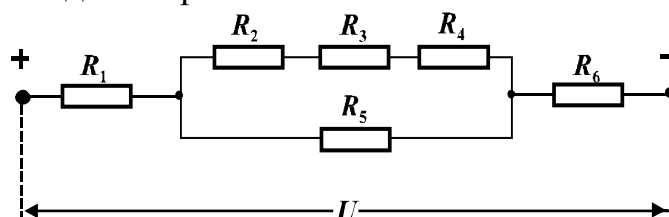


Рис. 5.



**ТАБЛИЦА 5. Числовые значения  $U$  и  $R$  для каждого варианта:**

<i>Вариант</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>
<b><math>U(B) =</math></b>	<b>83</b>	<b>110</b>	<b>138</b>	<b>165</b>	<b>193</b>	<b>220</b>	<b>248</b>	<b>275</b>
<b><math>R(A) =</math></b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<i>Вариант</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>14</i>	<i>15</i>	<i>16</i>
<b><math>U(B) =</math></b>	<b>41</b>	<b>28</b>	<b>14</b>	<b>55</b>	<b>88</b>	<b>11</b>	<b>22</b>	<b>33</b>
<b><math>R(A) =</math></b>	<b>15</b>	<b>22</b>	<b>24</b>	<b>28</b>	<b>32</b>	<b>16</b>	<b>20</b>	<b>12</b>

**ОПРЕДЕЛИТЬ:**

- 1) Полное сопротивление цепи.
- 2) Полный ток (силу тока на всем участке цепи).
- 3) Силу тока и напряжение на каждом сопротивлении.
- 4) Мощности токов на каждом сопротивлении.
- 5) Мощности токов, выделяющиеся на участках цепи.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.4

### ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Запустите программу «Открытая физика». Выберите «Электричество и магнетизм» и «Цепи постоянного тока».

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Моделирование цепей постоянного тока.

Экспериментальная проверка законов Кирхгофа.

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

**Законы Кирхго́фа** (или *правила Кирхгофа*) — соотношения, которые выполняются между токами и напряжениями на участках любой электрической цепи. Правила Кирхгофа позволяют рассчитывать любые электрические цепи постоянного тока, т.е. позволяют определить силу и направление тока в любой части разветвленной цепи, если известны сопротивления ее участков и включенные в них ЭДС.

Разветвленной цепью называется электрическая цепь, имеющая узлы.

♦ **Узел** – точка соединения трёх и более проводников.

В разветвленной цепи всегда можно выделить некоторое количество замкнутых путей, состоящих из однородных и неоднородных участков.

♦ **Контур** - замкнутый путь из проводников. При этом каждый проводник может входить в несколько контуров.

На разных участках выделенного контура могут протекать различные токи. На рис. 1 представлен простой пример разветвленной цепи. Цепь содержит два узла *a* и *d* и три контура *abcd*, *adef* и *bcef*.

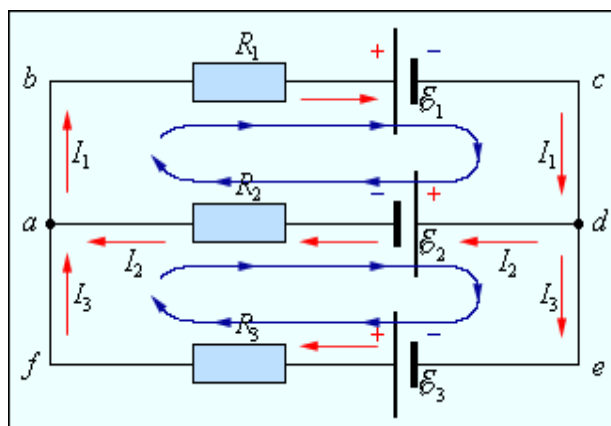


Рис. 1

Первое правило Кирхгофа является следствием закона сохранения заряда, согласно которому ни в одной точке проводника не должны накапливаться или исчезать заряды.

**Первое правило Кирхгофа (правило узлов):** алгебраическая сумма сил токов для каждого узла в разветвленной цепи равна нулю:

$$\sum_k I_k = 0 \quad (1)$$

Токи, втекающие в узел, принято считать положительными; токи, вытекающие из узла – отрицательными.

Второе правило Кирхгофа (правило контуров) является следствием обобщенного закона Ома.

**Второе правило Кирхгофа (правило контуров)** - в любом замкнутом контуре разветвленной цепи алгебраическая сумма ЭДС равна алгебраической сумме произведений токов на сопротивления соответствующих участков этого контура:

$$\sum_k I_k R_k = \sum_k \mathcal{E}_k \quad (2)$$

Подробный механизм применения правил Кирхгофа следующий:

1) Определить количество токов в цепи и обозначить их стрелками. Направление стрелок - произвольное (если в результате решения сила тока на каком-то участке оказывается отрицательной, то это означает, что ток на этом участке идет в направлении, противоположном выбранному направлению). Одним индексом обозначают ток, протекающий по всем последовательно соединенным элементам цепи от одного узла до другого.

2) Записать уравнение неразрывности для узла по первому правилу Кирхгофа (всего таких уравнений может быть на одно меньше, чем количество узлов).

Например, для узла *a* цепи, изображенной на рис.1:

$$I_2 + I_3 - I_1 = 0$$

3) Выделить все возможные контуры разветвленной цепи и выбрать для них (произвольным образом) *направление обхода*.

При записи второго правила Кирхгофа для каждого из участков цепи необходимо соблюдать «правила знаков» (рис.2):

- ток считается положительным, если направление тока совпадает с направлением обхода;

- э.д.с. берётся со знаком плюс, если создаваемый ею ток совпадает с направлением обхода; если не совпадает - с минусом.

4) Записать обобщенный закон Ома для разных замкнутых контуров цепи по второму правилу Кирхгофа.

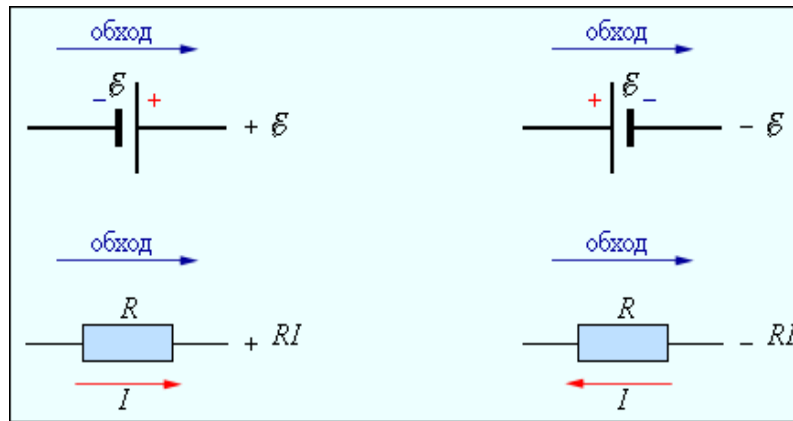


Рис. 2

Количество независимых уравнений второго правила Кирхгофа должно быть таким, чтобы общее количество уравнений оказалось равным количеству выделенных токов.

Из трех контуров, выделенных в цепи на рис.1, только два являются независимыми, так как третий не содержит никаких новых участков. Круговыми стрелками показано направление обхода контуров. Тогда для контура *adef* можно записать:

$$I_3 R_3 - I_2 R_2 = \varepsilon_2 + \varepsilon_3$$

Для контура *abcd*:

$$I_1 R_1 + I_2 R_2 = -\varepsilon_1 - \varepsilon_2$$

Таким образом, правила Кирхгофа сводят расчет разветвленной электрической цепи к решению системы линейных алгебраических уравнений.

### ЗАДАНИЕ ДЛЯ ДОПУСКА

Используя законы Кирхгофа решите задачу:

В схеме (рис.3)  $\varepsilon = 2$  В - элемент с внутренним сопротивлением, равным  $r=1$  Ом. Найти силу тока, текущего:

- 1) через сопротивление  $R_1 = 5$  Ом;
- 2) через сопротивление  $R_2 = 10$  Ом.

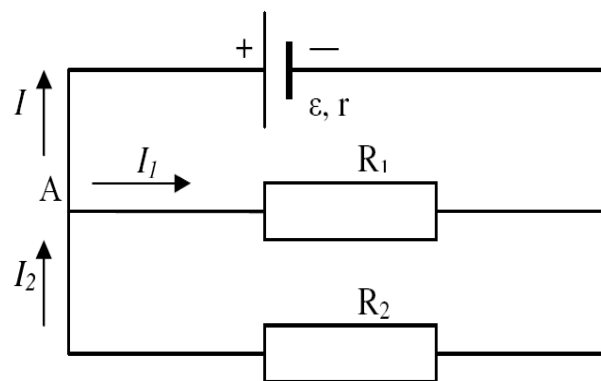


Рис. 3

## МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

1. Запустите программу. Выберите «Электричество и магнетизм» и «Цепи постоянного тока».
2. Внимательно рассмотрите рисунок. Найдите регуляторы с движками, задающие значения сопротивлений и ЭДС.
3. **Протестируйте модель.** Для этого соберите схему, соответствующую задаче в задании для допуска (рис.4). Сначала

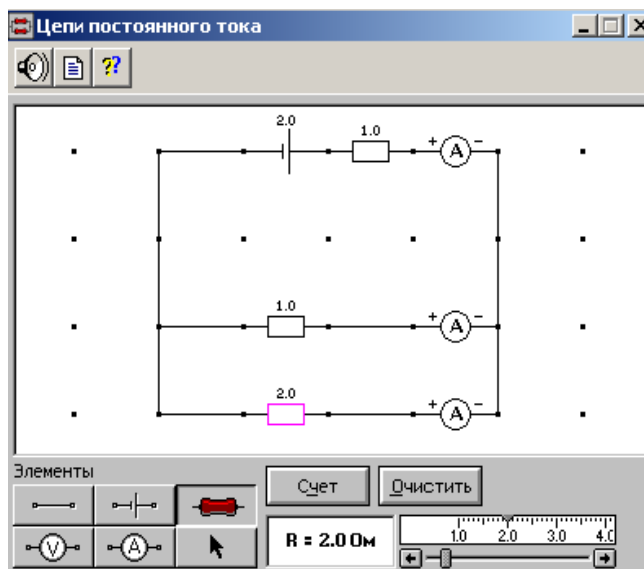
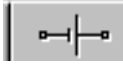




Рис. 4

щелкните левой кнопкой мыши над кнопкой  ЭДС в нижней части экрана. Переместите маркер мыши на рабочую часть экрана, где расположены точки. Щелкните левой кнопкой мыши в рабочей части экрана там, где будет расположен источник ЭДС. Разместите далее последовательно с источником резистор, изображающий его внутреннее сопротивление (нажав предварительно кнопку   $R$  в нижней части экрана) и амперметр (кнопка  там же). Затем расположите резисторы нагрузки и последовательно соединенные с ними амперметры. Подключите аналогичным образом соединительные провода. Установите значения параметров для каждого элемента, заданные в условии задачи. Для этого щелкните левой кнопкой мыши на кнопке со стрелкой. Затем щелкните на выбранном элементе. Подведите маркер мыши к движку появившегося регулятора, нажмите на левую кнопку мыши и, удерживая ее в нажатом состоянии, меняйте величину параметра до нужного значения. После того, как вы установили значения всех сопротивлений и ЭДС, нажмите кнопку «Счет» и запишите показания электроизмерительных приборов. Заполните таблицу 1. Сравните

величины силы токов, полученных при компьютерном измерении, с расчетными значениями, полученными при решении задач.

**ТАБЛИЦА 1. Тестирование модели.**

	Результаты расчета	Результаты измерений
$I$		
$I_1$		
$I_2$		

Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.

Приступайте к измерениям.

4. Соберите цепь, показанную на рисунке 5. Установите значения параметров для каждого элемента согласно Вашему варианту из таблицы 2.

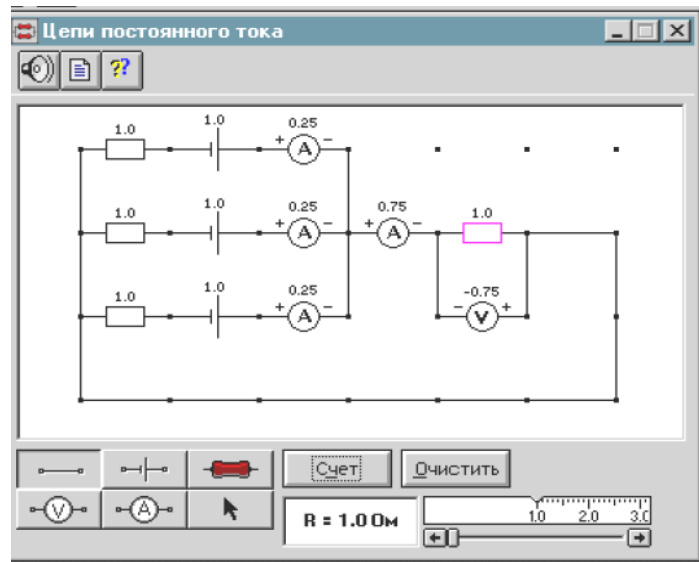


Рис. 5

**ТАБЛИЦА**

**2.**

**Значения э.д.с. и внутреннего сопротивления источников**

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\varepsilon_1$ [В]	3	4	3	6	-6	5	-4	8	4	5
$\varepsilon_2$	7	-3	6	-2	5	8	6	-4	2	-2
$\varepsilon_3$	-2	-8	-4	-8	8	-4	-7	6	-10	10
$R_1$ [Ом]	2	1	2	1	2	1	1	1	1	2
$R_2$	1	3	1	1	1	2	1	3	5	4
$R_3$	1	1	2	2	1	1	2	1	2	5

5. Установите сопротивления резистора нагрузки  $R = 1 \text{ Ом}$ . Измерьте значения всех токов и напряжения на нагрузке (щелкнув мышью по кнопке «Счет») и запишите их в таблицу 3. Последовательно увеличивая сопротивление  $R$ , повторите измерения параметров и заполните таблицу 3.

**ТАБЛИЦА 3.  
РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ**

$R$ [Ом]	$I_1$ [А]	$I_2$ [А]	$I_3$ [А]	$I$ [А]	$U$ [В]
1					
2					
3					
4					
5					

**ТАБЛИЦА 4.  
РЕЗУЛЬТАТЫ  
РАСЧЕТА**

$I_1$ [А]	$I_2$ [А]	$I_3$ [А]	$I$ [А]

6. Используя правила Кирхгофа, запишите систему уравнений для собранной цепи. Рассчитайте значения всех токов для каждого сопротивления нагрузки и запишите в таблицу 4.

7. Сравните результаты измерений и расчетов. Сделайте выводы.

**Письменно ответьте на следующие вопросы:**

1. Сформулируйте первый закон Кирхгофа. Какие свойства заряда он отражает?
2. Сформулируйте второй закон Кирхгофа. Следствием какого, более общего закона он является?
3. Что называется электрическим током? Постоянным электрическим током?
4. Как направлен электрический ток?
5. Дайте определения силы тока и плотности тока. В каких единицах они измеряются?
6. Что характеризуют электропроводность и сопротивление проводника? Как они связаны между собой? В каких единицах измеряются?
7. Как зависит сопротивление проводника от его размеров, формы и материала?
8. Что такое удельное сопротивление? В каких единицах оно измеряется?
9. Как рассчитать сопротивление участка цепи при последовательном и параллельном соединении проводников?
10. Сформулируйте условия существования тока в цепи.
11. Какие силы называются сторонними?

12. Что такое электродвижущая сила источника?
13. Что называется напряжением на участке цепи?
14. Какой участок цепи называется однородным? Неоднородным?
15. Закон Ома для однородного и неоднородного участка цепи.
16. Сформулируйте закон Ома для замкнутой цепи.
17. Что называется током короткого замыкания?

### ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ.

Перечертите схему для Вашего варианта (рис. 6) .

Источники тока с электродвижущими силами включены в цепь, как показано на схеме. Определить силы токов, текущих в сопротивлениях  $R_1, R_2, R_3, R_4$ . Значения ЭДС и сопротивлений заданы в таблице 5 для каждого варианта. Сопротивлениями источников тока пренебречь.

**ТАБЛИЦА 5. Числовые значения величин  $R_1, R_2, R_3, R_4$  и ЭДС**

Вариант	$R_1$ (Ом)	$R_2$ (Ом)	$R_3$ (Ом)	$R_4$ (Ом)	$\varepsilon_1$ (В)	$\varepsilon_2$ (В)	$\varepsilon_3$ (В)	$\varepsilon_4$ (В)	$\varepsilon_5$ (В)
1	2	2	4	4	10	-2	2	5	1
2	1	2	3	4	1	-5	3	2	-
3	10	10	15	20	10	-2	2	-5	1
4	5	2	10	5	2	4	2	4	-
5	2	2	4	4	-2	5	-5	2	1
6	4	8	2	10	-2	5	-5	2	-
7	1	3	5	7	3	6	2	4	-
8	2	4	6	8	1	2	3	4	-
9	5	2	10	5	1	-5	3	2	1



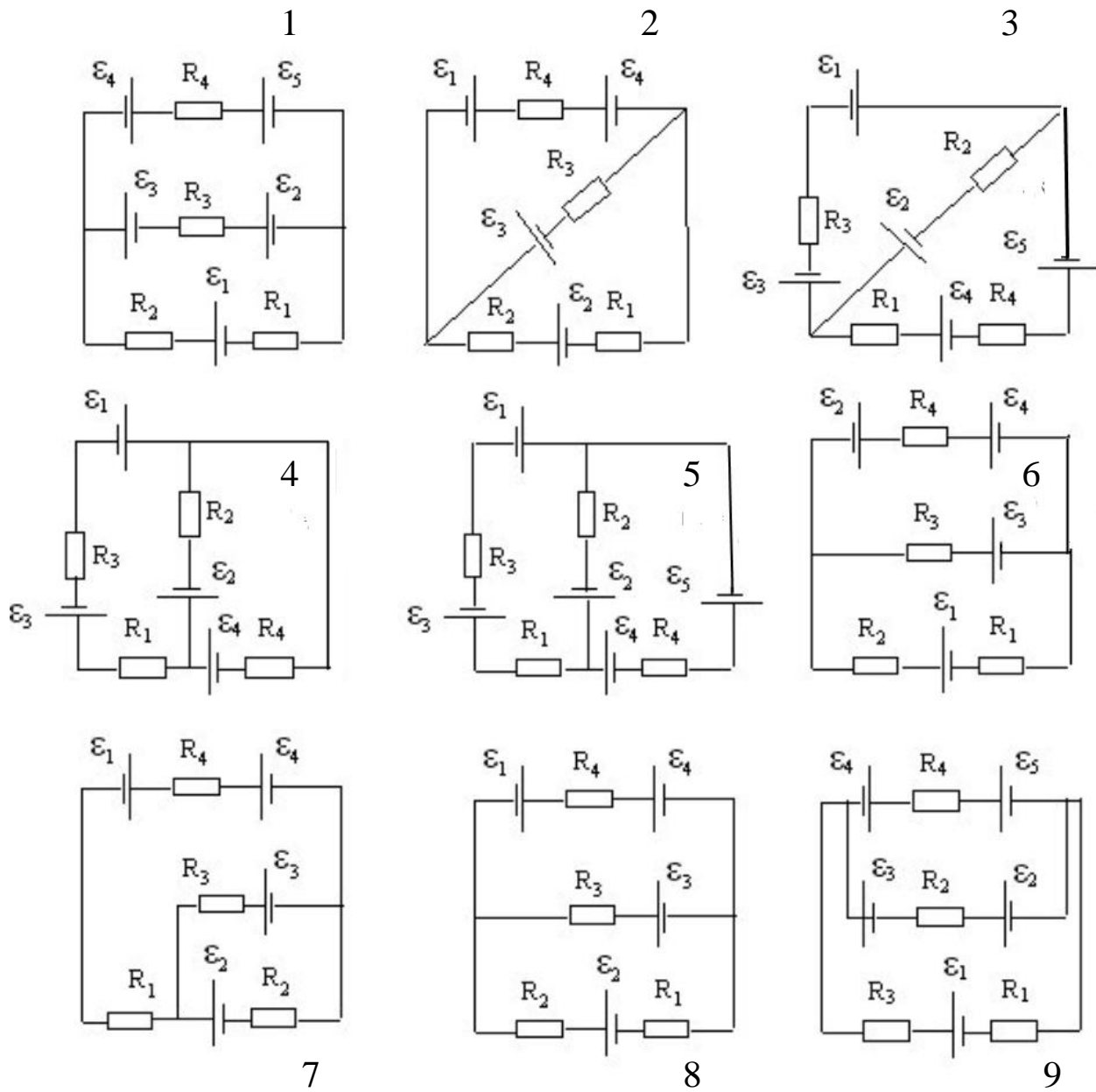


Рис. 6

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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

## НЕКОТОРЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ КОНСТАНТЫ

Название	Символ	Значение	Размерность
Гравитационная постоянная	G	$6.67 \cdot 10^{-11}$	$\text{Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-2}$
Ускорение свободного падения на поверхности Земли	$g_0$	9.81	$\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$
Скорость света в вакууме	c	$3 \cdot 10^8$	$\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$
Постоянная Авогадро	$N_A$	$6.02 \cdot 10^{23}$	$\text{моль}^{-1}$
Универсальная газовая постоянная	R	8.31	$\text{Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$
Постоянная Больцмана	k	$1.38 \cdot 10^{-23}$	$\text{Дж} \cdot \text{К}^{-1}$
Элементарный заряд	e	$1.6 \cdot 10^{-19}$	Кл
Масса электрона	$m_e$	$9.11 \cdot 10^{-31}$	кг
Электрическая постоянная	$\epsilon_0$	$8.85 \cdot 10^{-12}$	$\text{Ф} \cdot \text{м}^{-1}$
Магнитная постоянная	$\mu_0$	$4\pi \cdot 10^{-7}$	$\text{Гн} \cdot \text{м}^{-1}$
Постоянная Планка	h	$6.62 \cdot 10^{-34}$	$\text{Дж} \cdot \text{с}$

## ПРИСТАВКИ И МНОЖИТЕЛИ

для образования десятичных кратных и дольных единиц

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

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

## ГРЕЧЕСКИЙ АЛФАВИТ.

$\alpha$  - альфа,  $\beta$  - бета,  $\gamma$  - гамма,  $\Delta, \delta$  - дельта,  $\epsilon$  - эпсилон,  
 $\zeta$  - дзета,  $\eta$  - эта,  $\theta$  - тэта,  $\iota$  - нота,  $\kappa$  - каппа,  
 $\lambda$  - лямбда,  $\mu$  - мю,  $\nu$  - ню,  $\xi$  - кси,  $\omicron$  - омикрон,  
 $\pi$  - пи,  $\rho$  - ро,  $\Sigma, \sigma$  - сигма,  $\tau$  - тау,  $\phi$  - фи,  
 $\chi$  - хи,  $\Psi \psi$  - пси,  $\Omega, \omega$  - омега .

Кузовникова Людмила Александровна

Денисова Елена Александровна

Замкова Наталья Геннадьевна

## **Ф И З И К А**

**Виртуальный лабораторный практикум**

**ЧАСТЬ 2. Раздел 3. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО**

© Кузовникова Л.А.

© Денисова Е.А.

© Замкова Н.Г.

© Красноярский институт  
железнодорожного транспорта  
филиал ГОУ ВПО ИрГУПС в  
г.Красноярске

Редактор *Н.Г.Замкова*

Компьютерная верстка *Л.А. Кузовниковой*

Подписано в печать .

Формат 60 × 84/16

Бумага тип. № .

Офсетная печать.

Усл. печ. лист .

Уч.-изд. л. 4,0.

Заказ №

Тираж 350 экз.

Отпечатано

типография КриЖТ ИрГУПС  
г.Красноярск, ул.Ладо Кецховели, 89