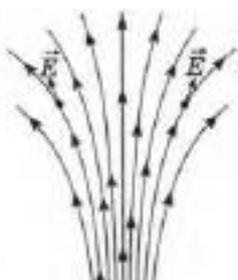


МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬ-
НОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ЕЛЕЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. И.А. БУНИНА»

И.Н. Зайцева, С.С. Токарева, Н.А. Ярлыкова

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ (ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА)

Учебно-методическое
пособие



Елец – 2025

УДК 537.8
ББК 22.313.25
3 12

*Размещено на сайте по решению редакционно-издательского совета
Елецкого государственного университета им. И.А. Бунина
от 26.02.2025 г., протокол № 1*

Рецензенты:

Е.В. Игонина, кандидат физико-математических наук, доцент по специальности математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, заведующий кафедрой математики, информатики, физики и методики обучения, Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина;

Е.С. Токарева, преподаватель высшей категории, председатель цикловой комиссии математических и общих естественнонаучных учебных дисциплин, Федеральное Агентство железнодорожного транспорта ВТЖТ филиала ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения».

И.Н. Зайцева, С.С. Токарева, Н.А. Ярлыкова

3 12 Основы электродинамики (Электрическое поле. Законы постоянного тока): учебно-методическое пособие. – Елец: Елецкий государственный университет им. И. А. Бунина, 2025. – 59 с.

В учебно-методическом пособии излагаются краткие теоретические сведения по курсу физики (раздел «Основы электродинамики»).

Пособие предназначено для студентов средних профессиональных учебных заведений, обучающихся по специальностям в области электротехники, энергетики, радиоэлектроники и автоматики, а также может быть полезно всем, кто желает самостоятельно освоить основы классической теории электричества. Материал излагается последовательно: от взаимодействия точечных зарядов к описанию сложных полей, а затем – к законам постоянного тока. Каждая тема сопровождается подробными примерами решения задач, контрольными вопросами для самопроверки и заданиями для самостоятельной работы.

Предназначено для обучающихся всех направлений подготовки, изучающих данную дисциплину, согласно учебному плану института среднего профессионального образования ЕГУ им. И.А. Бунина.

Пособие подготовлено согласно тематике рабочей программы учебной дисциплины и включает краткий теоретический материал с возможностью использования других дополнительных литературных источников и электронных ресурсов.

УДК 537.8
ББК 22.313.25

© Елецкий государственный
университет им. И.А. Бунина, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ЭЛЕКТРОСТАТИКА	5
1.1. Электризация тел.....	5
1.2. Электрический заряд. Взаимодействие зарядов	6
1.3. Закон сохранения электрического заряда.....	8
1.4. Закон Кулона	9
<i>Примеры решения задач.</i>	11
<i>Задачи для самостоятельного решения.</i>	15
2. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ	16
2.1. Напряженность электрического поля	16
2.2. Силовые линии электрического поля.....	17
2.3. Принцип суперпозиции полей	19
<i>Примеры решения задач.</i>	20
<i>Задачи для самостоятельного решения.</i>	20
<i>Контрольные вопросы.</i>	21
3. ПОТЕНЦИАЛЬНОСТЬ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ	22
3.1. Работа электростатического поля.....	22
3.2. Потенциал. Разность потенциалов	22
<i>Задачи для самостоятельного решения.</i>	23
3.3. Емкость. Конденсаторы	24
3.4. Соединения конденсаторов	25
<i>Задания для самостоятельного решения.</i>	26
<i>Задачи для самостоятельного решения.</i>	28
3.5. Энергия конденсатора.....	29
4. ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	30
4.1. Электрический ток. Условия существования электрического тока. Источники тока.	30
4.2. Измерение тока и напряжения.....	32
<i>Примеры решения задач.</i>	32
<i>Задачи для самостоятельного решения.</i>	34
<i>Контрольные вопросы.</i>	35

4.3. Закон Ома для участка цепи. Электрическое сопротивление	37
<i>Примеры решения задач</i>	39
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	40
4.4. Электродвижущая сила. Закон Ома для полной электрической цепи	41
4.5. Соединения проводников: последовательное, параллельное и смешанное.....	43
<i>Примеры решения задач</i>	44
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	47
<i>Задачи для контрольного решения</i>	49
4.6. Работа и мощность электрического тока.....	51
<i>Задания для самостоятельного решения</i>	53
<i>Контрольные вопросы</i>	54
ПРИЛОЖЕНИЕ	56
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	59

Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина

ВВЕДЕНИЕ

1. ЭЛЕКТРОСТАТИКА

Электродинамика – это раздел физики, изучающий взаимодействие между электрическими зарядами (как неподвижными, так и движущимися), свойства и законы поведения электромагнитного поля, а также законы, которым подчиняется электромагнитное излучение (свет, радиоволны и др.).

Таким образом, электродинамика – это наука о:

– электромагнитном поле – особом виде материи, которое окружает электрические заряды и существует в пространстве, передавая взаимодействие между ними с конечной скоростью (скоростью света);

– взаимодействию между электрическими зарядами, которое осуществляется посредством этого поля, а не напрямую;

– взаимосвязи электрических и магнитных явлений: переменное электрическое поле порождает магнитное поле, а переменное магнитное поле порождает вихревое электрическое поле. Эта взаимосвязь описывается уравнениями Максвелла – фундаментальными уравнениями классической электродинамики.

Электродинамика – раздел физики, изучающий свойства и взаимодействия электрических зарядов, осуществляемые посредством электромагнитного поля [5].

Электростатикой называется раздел электродинамики, в котором рассматриваются свойства и взаимодействия неподвижных электрически заряженных тел или частиц.

Электромагнитное взаимодействие – это взаимодействие между электрически заряженными частицами или макротелами.

1.1. Электризация тел

Явление электризации тел демонстрирует фундаментальный принцип неуничтожимости электрического заряда и лежит в основе многих современных технологий.

Электризация тел – это физическое явление, при котором на теле возникает избыточный электрический заряд в результате перераспределения или переноса заряженных частиц (обычно электронов). Это процесс приобретения телом статического электричества.

В нормальном состоянии атомы тела электрически нейтральны (количество протонов равно количеству электронов). При электризации происходит нарушение этого баланса.

Если тело теряет электроны – оно приобретает положительный заряд.

Если тело приобретает электроны – оно приобретает отрицательный заряд.

Основные способы электризации:

- ✓ Трением (наиболее известный способ).

Пример: Расчесывание волос пластиковой расческой. Электроны переходят с волос на расческу, волосы приобретают положительный заряд, расческа – отрицательный.

- ✓ Соприкосновением (контактом).

Пример: Заряженная палочка касается незаряженного металлического шарика, часть заряда переходит на шарик.

- ✓ Через влияние (электростатическая индукция).

Пример: Поднесение заряженного тела к изолированному проводнику вызывает перераспределение зарядов в нем без непосредственного контакта.

- ✓ С помощью излучения (фотоэффект).

Пример: Выбивание электронов с поверхности металла под действием света.

1.2. Электрический заряд. Взаимодействие зарядов

Точечный заряд – заряженное тело, размер которого мал по сравнению с расстоянием, на котором оценивается его действие.

Электрический заряд – скалярная физическая величина, определяющая способность тела быть источником электромагнитного поля и участвовать в электромагнитном взаимодействии.

Обозначение – q , единица измерения в СИ – кулон (Кл): $[q]=1\text{Кл}$.

Существуют два вида электрических зарядов: положительный и отрицательный.

Наименьший отрицательный заряд имеет электрон ($e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл), наименьший положительный заряд ($p = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл) – протон. Элементарная частица, не имеющая электрического заряда (нейтральная) – нейтрон (входит в состав атомного ядра).

Минимальный заряд, который может быть сообщен телу, равен заряду электрона (**элементарный заряд**). Частица может не иметь заряда, но заряд без частицы не существует.

Если тело имеет избыточные (лишние) электроны, то тело заряжено отрицательно, если у тела недостаток электронов, то тело заряжено положительно.

Величина любого заряда кратна элементарному: $q = \pm ne$, где n – целое число.

Взаимодействие электрических зарядов – это взаимное притяжение или отталкивание между заряженными телами или частицами, обусловленное их электрическим зарядом.

Электрические заряды взаимодействуют:

- ✓ заряды одного знака отталкиваются:

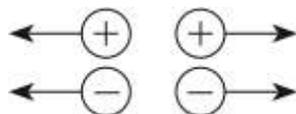


Рис. 1. Одноименные заряды

- ✓ заряды противоположных знаков притягиваются:



Рис. 2. Разноименные заряды

Таким образом, силы взаимодействия электрических зарядов являются центральными: они направлены вдоль прямой, соединяющей заряды, равны по величине и противоположны по направлению (следствие III закона Ньютона).

Прибор для обнаружения электрического заряда называется *электроскоп*. Основная часть прибора – металлический стержень, на котором закреплены два листочка металлической фольги, помещенные в стеклянный сосуд. При соприкосновении заряженного тела со стержнем электроскопа заряды распределяются между листочками фольги. Так как заряд листочков одинаков по знаку, они отталкиваются.

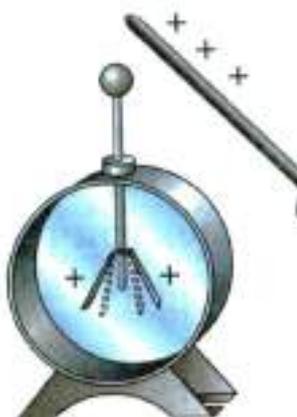


Рис. 3. Электроскоп

Для измерения зарядов можно использовать и *электрометр*. Основные части его – металлический стержень и стрелка, которая может вращаться вокруг горизонтальной оси. Стержень со стрелкой закреплен в пластмассовой

втулке и помещен в металлический корпус, закрытый стеклянными крышками. При соприкосновении заряженного тела со стержнем стержень и стрелка получают электрические заряды одного знака. Стрелка поворачивается на некоторый угол (рис. 4).

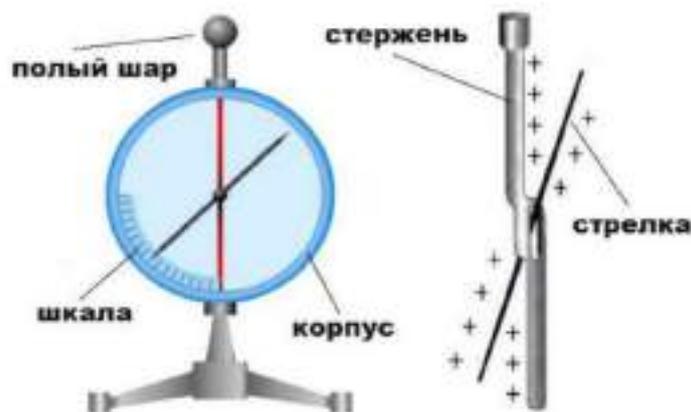


Рис. 4. Электрометр

1.3. Закон сохранения электрического заряда

Закон сохранения электрического заряда является фундаментальным физическим законом наряду с законами сохранения энергии и импульса. Впервые этот закон был сформулирован и подтвержден экспериментально в XIX веке, особенно благодаря работам английского ученого Майкла Фарадея, который показал постоянство общего заряда в электрической цепи. Изолированная система – это такая система, в которой отсутствуют любые потоки заряда внутрь или наружу. Иначе говоря, в такой системе зарядовые частицы не поступают извне и не покидают её пределы.

Общий заряд такой системы неизменен независимо от происходящих внутри неё взаимодействий.

Полный (суммарный) электрический заряд – это физическая величина, равная алгебраической сумме всех электрических зарядов в рассматриваемой системе тел или частиц:

$$q = q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n \quad (1)$$

Закон сохранения электрического заряда: Алгебраическая сумма всех электрических зарядов в изолированной системе остаётся постоянной.

$$q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \text{const} \quad (2)$$

где:

$q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n$ – электрические заряды, $[q]=1\text{Кл}$ (Кулон);

n – число зарядов.

Задача № 1. Как изменится масса тела при его электризации?

Решение: При электризации электроны переходят от одного тела другому. Учитывая тот факт, что масса электрона значительно меньше массы ядра, изменением массы тел можно пренебречь.

Действительно, $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, а масса $m_p = 1,66 \cdot 10^{-27}$ кг. Разница составляет 2000 раз.

Задача № 2. Какой заряд приобретают волосинки при расчесывании?

Решение:

Так как все волосинки обладают одинаковыми свойствами, атомы и электроны в них находятся в одинаковых условиях. Таким образом, электроны либо перейдут на расчёску, либо заберут электроны с расчёски. В любом случае заряд волосинок будет одинаковым.



Задача № 3.

С палочки сняли заряд $2q$, а затем ей передали заряд $-q$. Какой электрический заряд в итоге на палочке?

Решение: После того как с палочки сняли заряд $2q$, на ней остался заряд $-2q$. Затем дополнительно сообщили $-q$. В итоге заряд палочки составил $-3q$.



Задача № 4.

К двум висящим на нитях шарикам снизу подносят положительно заряженную пластину. В результате этого шарик занимает положение 1 и 2. Каков знак заряда каждого из шариков, если их начальное положение выделено цветом?

Решение: Так как в начальном положении шарик отталкивался друг от друга, то заряды на них одного знака. Поднесение пластины приводит к тому, что они отталкиваются от неё, следовательно, каждый шарик заряжен положительно.



Задача № 5. К двум висящим на нитях шарикам снизу подносят отрицательно заряженную пластину. В результате этого шарик занимает новое положение. Каков знак заряда каждого из шариков, если выделено их начальное положение?

1.4. Закон Кулона

Основной закон электростатики – это Закон Кулона, который устанавливает количественную зависимость силы взаимодействия между двумя неподвижными точечными зарядами. Это основной закон, описывающий силу взаимодействия двух неподвижных точечных зарядов в вакууме.

Закон Кулона: Сила взаимодействия двух точечных неподвижных зарядов прямо пропорциональна произведению величин этих зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2} \quad (3)$$

где:

F – сила взаимодействия, $[F] = 1\text{Н}$ (Ньютон);

q_1, q_2 – величины зарядов, $[q]=1\text{Кл}$ (Кулон);

r – расстояние между зарядами, $[r] = \text{м}$ (метр);

k – коэффициент пропорциональности ($k = 9 \cdot 10^9 \text{Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$).

Коэффициент k численно равен силе, с которой два точечных заряда величиной 1 Кл каждый взаимодействуют в вакууме на расстоянии 1 м.

Значение силы Кулона зависит от среды, в которой они находятся. В этом случае формула закона примет вид:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \quad \text{– закон Кулона в вакууме} \quad (4)$$

где:

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{Кл}^2 / (\text{Н} \cdot \text{м}^2)$ – электрическая постоянная.

Закон Кулона может применяться и для других сред:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \quad (5)$$

где:

ϵ – диэлектрическая проницаемость среды.

Чем больше диэлектрическая проницаемость ϵ среды, тем слабее сила кулоновского взаимодействия между зарядами. В вакууме, где нет посторонних частиц, сила взаимодействия максимальна.

Таблица 1.

Таблица диэлектрических проницаемостей веществ

Среда	Диэлектрическая проницаемость, ϵ
Вакуум	1,0
Воздух	$\approx 1,0006$
Вода	≈ 81
Стекло	4-10
Керосин	≈ 2

Сила Кулона направлена вдоль прямой, соединяющей взаимодействующие заряды. Заряды взаимодействуют друг с другом с силами, равными по величине и противоположными по направлению.

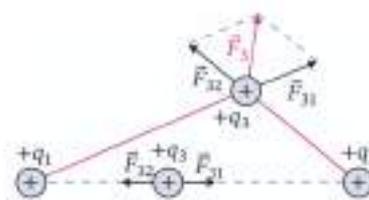


Рис. 5. Взаимодействие электрических зарядов

Примеры решения задач

Задача № 1. Два точечных положительных заряда q_1 и q_2 закреплены на некотором расстоянии друг от друга. Существует ли точка, в которой третий заряд будет находиться в равновесии?

Дано:	Решение:
q_1 q_2	<p>В положении статического равновесия векторная сумма сил, действующих на заряд, равна 0. На заряд q_3 со стороны двух других зарядов действуют силы электростатического взаимодействия F_{31} и F_{32}.</p> <p>Если q_3 – положительный, то сумма сил, действующих на него со стороны двух других зарядов, может быть равна 0 только в случае, когда он находится на прямой, проходящей через два других заряда. Аналогичная ситуация будет при смене знака заряда q_3 на противоположный: силы F_{31} и F_{32}, а также их сумма, поменяют направления.</p> <p>Если заряд q_3 находится вне отрезка прямой между q_1 и q_2, то равновесие также не может быть достигнуто, т.к. в этом случае силы F_{31} и F_{32} направлены в одну сторону.</p>
<p>Найти:</p> <p>Существует ли точка, в которой третий заряд будет находиться в равновесии</p>	<p><i>Ответ:</i> Точка существует и равновесное состояние может быть только в случае, когда q_3 находится на отрезке прямой, соединяющем q_1 и q_2.</p>



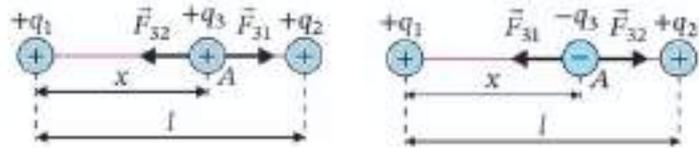
Задача № 2. Определите положение точек пространства, в которых заряд находится в положении равновесия (см. задачу № 1), считая величины зарядов q_1 , q_2 и q_3 , а также – расстояние между q_1 и q_2 , известными.

Дано:

q_1
 q_2
 q_3
 l

Решение:

Пусть x – положение точек, в которых может быть достигнуто равновесие. В случае равновесия силы, действующие на q_3 (обозначим их F_{31} и F_{32}), равны по модулю и противоположны по направлению. Так как обе силы одновременно либо отталкивают, либо притягивают q_3 , то положение равновесия не зависит от знака последнего. Это также можно показать



математически

Согласно закона Кулона, выразим силы F_{31} и F_{32} , приравняем их:

$$F_{31} = k \frac{q_1 q_3}{x^2}, F_{32} = k \frac{q_2 q_3}{(l-x)^2}.$$

$$k \cdot \frac{q_1 q_3}{x^2} = k \cdot \frac{q_2 q_3}{(l-x)^2}.$$

Преобразуем полученное соотношение:

$$\frac{q_1}{x^2} = \frac{q_2}{(l-x)^2}.$$

То есть равновесие заряда q_3 не зависит ни от знака, ни от величины заряда l

$$q_1(l-x)^2 - q_2 x^2 = 0;$$

$$(\sqrt{q_1}(l-x) - \sqrt{q_2}x) \cdot (\sqrt{q_1}(l-x) + \sqrt{q_2}x) = 0.$$

Найдём x , приравняв скобки последнего равенства к 0:

$$x_1 = l \frac{\sqrt{q_1}}{\sqrt{q_1} + \sqrt{q_2}}; x_2 = l \frac{\sqrt{q_1}}{\sqrt{q_1} - \sqrt{q_2}}.$$

Второй корень не подходит, т.к. $x < l$. Таким образом,

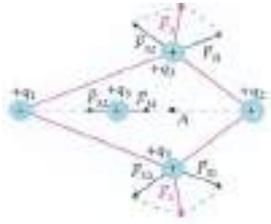
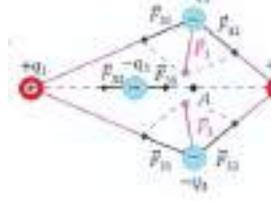
$$x = l \frac{\sqrt{q_1}}{\sqrt{q_1} + \sqrt{q_2}}.$$

Найти:

x – положение точек пространства, в которых заряд находится в положении равновесия

Ответ: $l \frac{\sqrt{q_1}}{\sqrt{q_1} + \sqrt{q_2}}$ от q_1 .

Задача № 3. Является ли равновесие системы точечных электрических зарядов устойчивым?

<i>Дано:</i>	<i>Решение:</i>
<p>системы точечных электрических зарядов</p>	<p>Система из двух зарядов неустойчива. Необходимо закрепить заряды, чтобы они находились в равновесии. Рассмотрим систему из трёх точечных зарядов q_1, q_2 и q_3, причём q_1 и q_2 – положительные и они закреплены. Равновесие является устойчивым, если при любом смещении тела из положения равновесия возникают силы, возвращающие его в это положение.</p> <p>1) Рассмотрим ситуацию, когда q_3 – положительный.</p>  <p>Пусть А – точка положения равновесия. Силы, действующие на q_3, обозначим F_{31} и F_{32}. При смещении заряда q_3 из данной точки в направлении одного из зарядов (например, q_1), согласно закону Кулона, модуль силы F_{31} становится больше модуля силы F_{32}, в результате чего сумма двух рассматриваемых сил направлена к положению равновесия (к точке А). Ситуация со смещением заряда q_3 в сторону от отрезка, соединяющего заряды q_1 и q_2, выглядит иначе. В этом случае равнодействующая сил F_{31} и F_{32} направлена таким образом, чтобы удалить заряд q_3 от положения равновесия. Смещение шарика может быть направлено в любую сторону, следовательно, в итоге равновесие будет неустойчивым.</p> <p>2) Рассмотрим ситуацию, когда q_3 – отрицательный.</p>  <p>При его смещении из точки А в направлении одного из зарядов (например, q_1), согласно закону Кулона, модуль силы F_{31} становится больше модуля силы F_{32}, в результате чего сумма двух рассматриваемых сил направлена таким образом, чтобы удалить заряд q_3 от положения равновесия. А при смещении q_3 в сторону от отрезка, соединяющего заряды q_1 и q_2, равнодействующая сил F_{31} и F_{32} направлена таким образом, чтобы вернуть заряд q_3 в положение равновесия. В этом случае равновесие будет неустойчивым. Система статических зарядов не может быть устойчивой. То есть стабильное вещество может состоять только из движущихся зарядов.</p>
<p><i>Найти:</i> Устойчиво ли равновесие системы точечных электрических зарядов</p>	<p><i>Ответ:</i> Равновесие неустойчиво.</p>

Задача № 4. Заряженные шарики, находящиеся на расстоянии $r = 0,4$ м друг от друга, отталкиваются с силой $F = 81$ мН. Найдите заряд каждого шарика, если их суммарный заряд $Q = 2,5$ мкКл.

<i>Дано:</i> $r = 0,4$ м $F = 81$ мН $Q = 2,5$ мкКл	<i>Решение:</i> 1) Так как шарики отталкиваются и их суммарный заряд положителен, то заряд каждого шарика также положителен. 2) Воспользовавшись законом Кулона, запишем соотношение для силы электростатического взаимодействия зарядов: $F = k \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2}.$ Выразим произведение модулей зарядов и рассчитаем его: $q_1 \cdot q_2 = \frac{F \cdot r^2}{k} = \frac{81 \cdot 10^{-3} \cdot (0,4)^2}{9 \cdot 10^9} = 1,44 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2.$ 3) Учитывая, что сумма $q_1 + q_2 = 2,5 \cdot 10^{-6}$ Кл, находим $q_1 = 1,6$ мкКл и $q_2 = 0,9$ мкКл.
<i>Найти:</i> q_1, q_2 - ?	<i>Ответ:</i> $q_1 = 1,6$ мкКл, $q_2 = 0,9$ мкКл.

Задача № 5. В вершинах прямоугольника ABCD находятся точечные электрические заряды $q_1 = 2$ нКл (в вершине А), $q_2 = -8$ нКл (в вершине В) и $q_3 = 2$ нКл (в вершине С). Расстояние АВ = 2 см, ВС = 6 см. Определите силу электростатического взаимодействия F_2 , действующую на заряд q_2 со стороны двух других зарядов.

<i>Дано:</i> $q_1 = 2$ нКл $q_2 = -8$ нКл $q_3 = 2$ нКл АВ = 2 см ВС = 6 см	<i>Решение:</i> 1) Обозначим F_{21} силу взаимодействия зарядов q_2 и q_1 , F_{23} – за силу взаимодействия зарядов q_2 и q_3 . Направление сил определим по основным свойствам электрического заряда: q_1 и q_3 будут притягивать q_2 . 2) Опираясь на закон Кулона, запишем соотношения для модулей введённых сил взаимодействия (в соотношениях укажем только модули зарядов): $F_{21} = k \cdot \frac{q_1 q_2}{AB^2}, F_{23} = k \cdot \frac{q_3 q_2}{BC^2}.$ 3) Выражение для расчёта силы F_2 получим по правилу сложения сил и с помощью теоремы Пифагора: $F_2 = \sqrt{F_{21}^2 + F_{23}^2} = k q_2 \sqrt{\left(\frac{q_1}{AB^2}\right)^2 + \left(\frac{q_3}{BC^2}\right)^2}$ $F_2 = 9 \cdot 10^9 \cdot 8 \cdot 10^{-9} \sqrt{\left(\frac{2 \cdot 10^{-9}}{(0,02)^2}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot 10^{-9}}{(0,06)^2}\right)^2} \approx 0,36 \text{ Мн}$
<i>Найти:</i> F_2 - ?	<i>Ответ:</i> 0,36 Мн.

Задачи для самостоятельного решения

Задача № 1. В вершинах квадрата со стороной $a = 20$ см находятся одинаковые точечные отрицательные заряды $q = -3$ нКл. Определите силу, действующую на каждый заряд.

Задача № 2. В вершинах равностороннего треугольника со стороной $a = 40$ см находятся три одинаковых положительных точечных заряда, на каждый из которых действует сила $F = 34,6$ Н. Найдите значения зарядов.

Задача № 3. Небольшие одинаковые шарики массой $m = 10$ г каждый подвешены на закреплённых в одной точке нитях одинаковой длины $l = 0,8$ м. Определите суммарный заряд, сообщённый шарикам, если после этого угол между нитями составил $\alpha = 60^\circ$.

Задача № 4. На расстоянии $r = 18$ см друг от друга находятся точечные заряды q и $4q$. На каком расстоянии от заряда $4q$ следует поместить третий заряд, чтобы система находилась в равновесии? Определите знак этого заряда.

Задача № 5. Три одинаковых точечных отрицательных заряда $q = -17,3$ мкКл расположены в вершинах равностороннего треугольника. Какой заряд следует поместить в центре треугольника, чтобы вся система зарядов находилась в равновесии?

2. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Электрическое поле – это особая форма материи, существующая вокруг электрически заряженных тел.

Впервые понятие электрического поля было введено Фарадеем. Он объяснял взаимодействие зарядов следующим образом: каждый заряд создает вокруг себя электрическое поле, которое с некоторой силой действует на другой заряд.

Свойства электрического поля:

- ✓ материально;
- ✓ создается зарядом;
- ✓ обнаруживается по действию на заряд;
- ✓ непрерывно распределено в пространстве;
- ✓ ослабевает с увеличением расстояния от заряда [5].

2.1. Напряженность электрического поля

Электрическое поле заряженного тела воздействует на окружающие объекты, создавая силы, которые стремятся либо притянуть, либо оттолкнуть их, заставляя тела поворачиваться и двигаться. Также эти силы могут в зависимости от знака заряда вызвать притяжение или отталкивание.

Величину, с которой сила действует на положительный заряд в данной точке, называют напряженностью – это силовая характеристика электрического поля. Она существует в пространстве вокруг заряженного тела независимо от того, есть там другой заряд или нет.

Напряженность электрического поля – векторная физическая величина, равная отношению силы F , действующей на пробный точечный заряд, к величине этого заряда q :

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (6)$$

где:

\vec{E} – напряженность электрического поля, $[E]=1\text{Н/Кл}$;

q – электрический заряд, $[q]=1\text{Кл}$ (Кулон).

Чем больше заряд, тем сильнее поле, которое он создает.

Таким образом, можно найти силу, с которой электрическое поле действует на заряд, можно рассчитать по формуле:

$$\vec{F} = q \vec{E} \quad (7)$$

Напряженность поля точечного заряда в вакууме вычисляется по формуле:

$$E = \frac{k \cdot q_0}{r^2} \quad (8)$$

где:

k – коэффициент пропорциональности ($k = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$)

q_0 – точечный заряд, создающий поле,

r – расстояние от заряда, который создает поле, до данной точки.

Если поле существует не в вакууме, а в какой-либо среде (например, в воде, воздухе, стекле), то эта среда ослабляет электрическое поле.

Это ослабление характеризуется диэлектрической проницаемостью среды (ε).

Напряженность поля точечного заряда в среде вычисляется по формуле:

$$E = \frac{k \cdot q_0}{\varepsilon \cdot r^2} \quad (9)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость среды.

Для эталонной среды в $\varepsilon = 1$, в любой другой среде $\varepsilon > 1$.

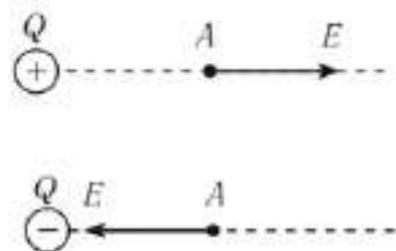
2.2. Силовые линии электрического поля

Направление вектора напряженности совпадает с направлением силы, действующей на положительный заряд, и противоположно направлению силы, действующей на отрицательный заряд.

Линией напряженности электрического поля называется линия, касательная к которой в каждой точке направлена вдоль вектора напряженности \vec{E} .

Так как напряженность векторная величина, следовательно, она имеет направление, которое зависит от знака заряда:

- ✓ если заряд положительный ($q > 0$), вектор напряженности направлен от заряда (поле «выталкивает» положительный пробный заряд)
- ✓ если заряд отрицательный ($q < 0$), вектор напряженности направлен к заряду (поле «втягивает» положительный пробный заряд)



Распределение линий напряженности представлено на рисунке 6.

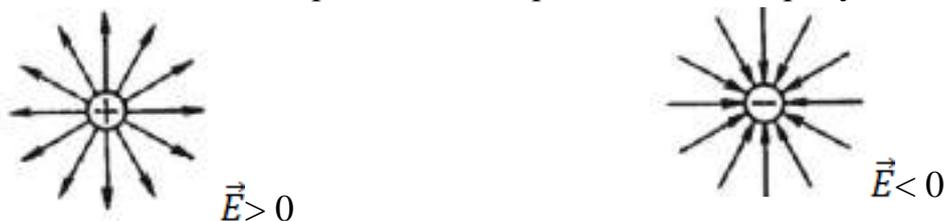


Рис. 6. Распределение линий напряженности

Определяя направление вектора \vec{E} в различных точках пространства, можно представить картину распределения линий напряженности электрического поля (рисунок 7).

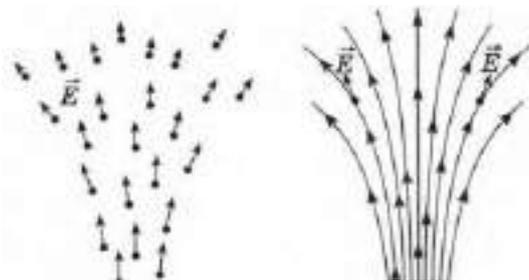
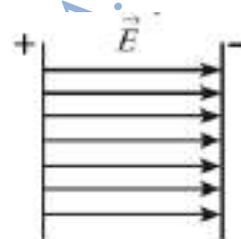


Рис. 7. Картинка линий напряженности

Поле, в котором напряженность одинакова по модулю и направлению в любой точке, называется **однородным электрическим полем**. Однородным можно считать электрическое поле между двумя разноименно заряженными металлическими пластинами. Линии напряженности в однородном электрическом поле параллельны друг другу.



Касательная к линии в любой точке показывает направление вектора напряженности E в этой точке.

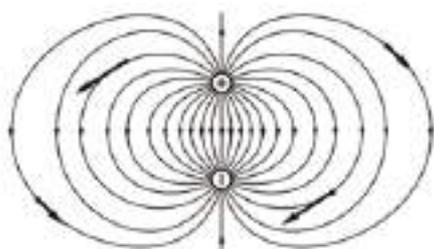
Густота (плотность) линий показывает величину (модуль) напряженности.

Свойства линий напряженности:

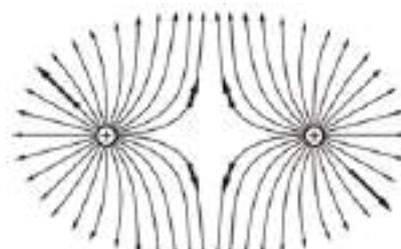
- ✓ **Незамкнутость:** линии напряженности электростатического поля не замкнуты – они начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных. В отсутствие зарядов линии уходят в бесконечность.
- ✓ **Непрерывность:** линии напряженности являются непрерывными - они не обрываются в пространстве, свободном от зарядов.
- ✓ **Непересекаемость:** линии напряженности не пересекаются. В каждой точке поля вектор напряженности имеет только одно направление.
- ✓ **Направленность:** направление линии указывает направление вектора напряженности в данной точке поля.
- ✓ **Плотность линий:** густота (плотность) линий напряженности пропорциональна модулю напряженности поля – где линии расположены гуще, там поле сильнее.
- ✓ **Перпендикулярность поверхности проводника:** в электростатике линии напряженности у поверхности проводника всегда перпендикулярны его поверхности.

✓ *Сходимость и расходимость*: линии «выходят» из положительных зарядов (расходятся); линии «входят» в отрицательные заряды (сходятся).

Линии напряженности электростатического поля начинаются на положительных электрических зарядах и заканчиваются на отрицательных электрических зарядах или уходят в бесконечность от положительного заряда и приходят из бесконечности к отрицательному заряду [5].



Линии напряженности двух разноименных зарядов



Линии напряженности двух одноименных зарядов

Рис. 8. Линии напряженности

2.3. Принцип суперпозиции полей

Для всех линейных полей выполняется принцип суперпозиции, который позволяет находить напряженность поля, создаваемого несколькими зарядами. В этом случае поле в любой точке пространства вычисляется, как векторная сумма полей всех элементарных зарядов.

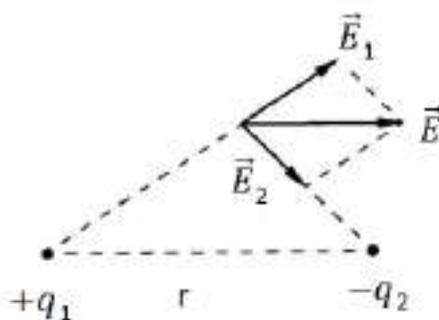


Рис. 9. Напряженность поля точечных зарядов

Принцип суперпозиции полей: напряжённость результирующего поля, созданного несколькими источниками, равна векторной сумме напряжённостей полей от каждого источника в отдельности.

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \quad (10)$$

Примеры решения задач

Задача № 1. В однородном электрическом поле в вакууме с напряжённостью 2 МВ/м на нити висит шарик массой 3 г и зарядом 5 нКл. Определите силу натяжения нити, если силовые линии поля составляют с вертикалью угол 30°.

Дано:

$E = 2 \text{ МВ/м}$
 $m = 3 \text{ г}$
 $q = 5 \text{ нКл}$
 $\alpha = 30^\circ$

Решение:

1) Обозначим силы, действующие на шарик: сила тяжести mg , сила электрического взаимодействия $F_э$ и сила натяжения нити T . Шарик покоится, значит их сумма равна 0. Сила натяжения нити по модулю равна сумме силы тяжести и силы электрического взаимодействия.

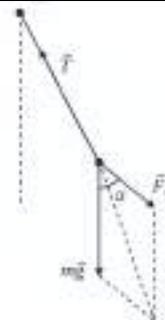
2) Выразим силу электрического взаимодействия из соотношения для напряжённости поля: $F_э = qE$.

3) Искомую сумму сил определим по правилу треугольника и, воспользовавшись теоремой косинусов, запишем итоговое соотношение и произведём расчёт:

$$T = \sqrt{(mg)^2 + (qE)^2 - 2 \cdot mg \cdot qE \cdot \cos(\pi - \alpha)} =$$

$$= \sqrt{(mg)^2 + (qE)^2 + 2 \cdot mg \cdot qE \cdot \cos \alpha} =$$

$$= \sqrt{(3 \cdot 10^{-3} \cdot 10)^2 + (5 \cdot 10^{-9} \cdot 2 \cdot 10^6)^2 + 2 \cdot 3 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 5 \cdot 10^{-9} \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}} \approx 39 \text{ мН.}$$



Найти: T -?

Ответ: $\approx 39 \text{ мН}$.

Задача № 2. Два шарика массами m_1 и m_2 с зарядами q_1 и q_2 соединены лёгкой непроводящей нитью длиной l . Шарик массой m_1 прикреплен к потолку ещё одной лёгкой непроводящей нитью. Вся система находится в однородном электрическом поле, напряжённость которого направлена вертикально вниз и равна E . Определите силы натяжения нитей.

Задачи для самостоятельного решения

Задача. При напряженности E электрического поля в проводнике через поперечное сечение проводника длиной l и сопротивлением R за время t проходит заряд q . Определите значение величины, обозначенной *. Как изменится сила тока в проводнике, если напряженность электрического поля уменьшить в β раз? Сопротивление проводника при этом считайте неизменным.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$E, \text{ В/м}$	10	3,0	*	2,5	20	*	0,5	20	5,0	6,0	40	1,0
$l, \text{ м}$	*	10	2,0	4,0	2,0	20	40	0,5	*	5,0	0,5	10
$R, \text{ Ом}$	80	*	10	40	40	60	*	5,0	20	120	120	20
$t, \text{ с}$	2,0	4,0	10	20	*	10	20	5,0	30	*	*	40
$q, \text{ Кл}$	1,0	4,0	20	*	2,0	5,0	5,0	*	60	15	15	*

Контрольные вопросы

1. Дать определение напряжённости электрического поля.
2. Записать формулу напряжённости электрического поля по определению.
3. В каких единицах изменяется напряжённость электрического поля?
4. Записать формулу напряжённости поля точечного заряда.
5. Что такое поверхностная плотность заряда?
6. Записать формулу напряжённости поля бесконечной плоскости с поверхностной плотностью заряда σ .
7. Дать определение линий напряжённости (силовых линий электрического поля).
8. Перечислить свойства силовых линий.
9. Дать определение однородного электрического поля. Изобразить его на рисунке.
10. Сформулировать принцип суперпозиции полей.

Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина

3. ПОТЕНЦИАЛЬНОСТЬ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

3.1. Работа электростатического поля

Работа электростатического поля по перемещению заряда не зависит от формы траектории пути, а определяется только начальным и конечным положением заряда и вычисляется по формуле:

$$A = qEd \cos \alpha \quad (11)$$

где:

A – работа электростатического поля, $[A]=1$ Дж (Джоуль);

E – напряженность электрического поля, $[E]=1$ Н/Кл;

q – электрический заряд, $[q]=1$ Кл;

d – расстояние перемещения заряда, $[d]=$ м;

α – угол между векторами напряженности электрического поля и перемещения заряда.

Электростатическое поле – потенциально. Физический смысл состоит в том, что работа электростатического поля равна изменению потенциальной энергии заряда, взятого с обратным знаком:

$$A = -(W_{п1} - W_{п2}) = -\Delta W \Rightarrow W = qEd \quad (12)$$

Если поле совершает положительную работу ($A > 0$), потенциальная энергия заряда уменьшается и самопроизвольно перемещается в сторону уменьшения своей потенциальной энергии.

Если поле совершает отрицательную работу ($A < 0$), то потенциальная энергия заряда увеличивается, и для его перемещения требуется действие внешних сил.

Если работа поля равна нулю ($A = 0$), то заряд перемещается по замкнутой траектории.

3.2. Потенциал. Разность потенциалов

Помимо силовой характеристики электростатического поля существует энергетическая – это потенциал, который определяет потенциальную энергию единичного положительного заряда, помещённого в данную точку.

Потенциал – скалярная физическая величина, равная отношению потенциальной энергии электрического заряда в электростатическом поле к величине этого заряда [5]:

$$\varphi = \frac{W}{q} \quad (13)$$

где:

W – потенциальной энергии электрического заряда, $[W]=1$ Дж (Джоуль);

φ – потенциал электростатического поля, $[\varphi]=1$ В (Вольт);

q – электрический заряд, $[q]=1$ Кл;

Подставив в формулу значение потенциальной энергии из формулы 12, получим формулу связи потенциала и напряженности:

$$\varphi = Ed - \text{потенциал однородного поля} \quad (14)$$

Потенциал это скалярная величина, и можно складывать алгебраически.

Принцип суперпозиции потенциалов: потенциал результирующего электростатического поля в данной точке пространства равен алгебраической сумме потенциалов, создаваемых в этой точке каждым зарядом в отдельности.

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots \quad (15)$$

Если известен заряд точки, удаленной от нее на расстоянии r , то потенциал однородного поля точечного заряда вычисляется по формуле:

$$\varphi = \frac{kq}{r} \quad (16)$$

Связь силовой и энергетической характеристик электростатического поля выражается **разностью потенциалов** между двумя точками — это работа, которую совершает электростатическое поле по перемещению единичного положительного заряда из одной точки в другую:

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q} \quad (17)$$

Разность потенциалов еще называют **напряжением** – это работа поля по перемещению единичного положительного заряда:

$$U = \Delta\varphi = \frac{A}{q} \quad (18)$$

где:

U – напряжение, $[U]=1$ В (Вольт).

Задачи для самостоятельного решения

Задача. Частица с зарядом q , перемещаясь в электрическом поле из точки с потенциалом φ_1 в точку с потенциалом φ_2 , проходит разность потенциалов (напряжение) U . При этом электрическим полем совершается работа A . Опре-

делите значение величин, обозначенных *. Чему равны изменения кинетической и потенциальной энергий частицы в рассматриваемом случае?

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$q, 10^{-19}$ Кл	*	1,6	3,2	4,8	*	3,2	4,8	1,6	*	4,8	1,6	3,2
$\varphi_1, В$	200	*	550	*	*	*	780	600	850	*	900	*
$\varphi_2, В$	*	300	*	80	100	300	*	*	*	250	*	600
$U, В$	50	*	*	200	100	*	*	200	500	*	*	100
$A, 10^{-17}$ Дж	1,6	2,4	11,2	*	4,8	6,4	24	*	8,0	9,6	6,4	*

3.3. Электроемкость. Конденсаторы

Величина, характеризующая способность проводника или системы проводников накапливать электрический заряд, это электрическая емкость или электроемкость.

Электроемкость – это скалярная физическая величина, равная отношению заряда одного из проводников к разности потенциалов (напряжению) между ними:

$$C = \frac{q}{\varphi} = \frac{q}{U} \quad (19)$$

где:

C – электроемкость, $[C]=1\text{Ф}$ (Фарад).

Электроемкость показывает, сколь много электрического заряда может удерживать проводник или система при конкретном (заданном) напряжении.

Свойства электроемкости:

- ✓ ёмкость проводника зависит от его геометрических размеров и формы;
- ✓ ёмкость зависит от свойств окружающей среды (диэлектрической проницаемости среды):

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d} \quad (20)$$

где:

S – площадь пластин, $[S]=1\text{м}^2$;

d – расстояние между пластинами, $[d]=1\text{м}$;

ε – диэлектрическая проницаемость вещества;

$\varepsilon_0=8,85 \cdot 10^{-12}$ Кл²/(Н·м²) – электрическая постоянная.

- ✓ ёмкость не зависит от материала проводника (если это идеальный проводник).

Диэлектрическая проницаемость наиболее часто используемых веществ при решении задач представлена таблице 1.

Диэлектрическая проницаемость веществ (при 20°C)

Вещество	Диэлектрическая проницаемость, ϵ	Вещество	Диэлектрическая проницаемость, ϵ
Вода	81	Парафин	2,0
Масло трансформаторное	2,2	Стекло	7,0
Слюда	7,0	Фарфор	5,0
Воск	7,8	Керосин	2,0
Глицерин	42,4	Эбонит	3
Кварц	4	Текстолит	8

Систему из двух проводников, разделенных слоем диэлектрика, называют **конденсатором**. Проводники при этом называются обкладками конденсатора, заряды которых равны по величине и противоположны по знаку. Конденсаторы применяют для накопления электрических зарядов и управления электрической энергией, а именно ее накапливать, фильтровать и регулировать.

Виды конденсаторов:

- ✓ по емкости: постоянные, переменные и подстроечные;
- ✓ по форме: плоские, цилиндрические и сферические;
- ✓ по типу диэлектрика: керамические, электролитические, воздушные, бумажные, слюдяные, танталовые, пленочные и др.
- ✓ по назначению: пусковые, импульсные и помехоподавляющие.

Самый распространенный тип **плоский конденсатор**, который представляет собой две плоские параллельные пластины, расположенные на определенном расстоянии и разделенных слоем диэлектрика (рисунок 10).

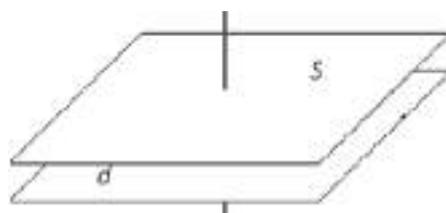


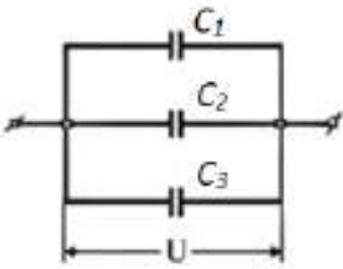
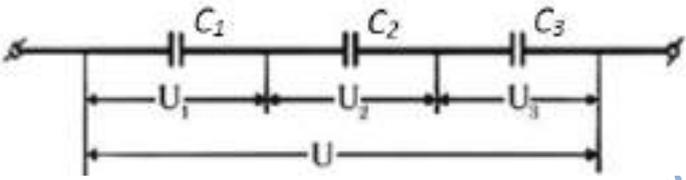
Рис. 10. Плоский конденсатор

3.4. Соединения конденсаторов

На электрической схеме конденсаторы обозначаются:



Схемы соединения конденсаторов:

Параллельное соединение (одноименно заряженные обкладки)	Последовательное соединение (разноименно заряженные обкладки)
	
$U = U_1 = U_2 = U_3$	$q = q_1 = q_2 = q_3$
$q = q_1 + q_2 + q_3$	$U = U_1 + U_2 + U_3$
$C = C_1 + C_2 + C_3$	$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$

Задания для самостоятельного решения

1. В каком из перечисленных ниже случаев электрическое поле можно считать примерно однородным?

- 1) поле точечного заряда
- 2) поле двух равных по модулю и противоположных по знаку точечных зарядов
- 3) поле заряженного шара
- 4) поле между двумя заряженными пластинами плоского конденсатора
- 5) во всех случаях, перечисленных в ответах 1-4

2. Как называется физическая величина, равная отношению заряда на одной из обкладок конденсатора к напряжению между обкладками?

- 1) потенциал электрического поля
- 2) напряженность электрического поля
- 3) электрическое напряжение
- 4) емкость

3. В данной точке электрического поля на отрицательный точечный заряд действует сила, направленная на север, вектор скорости заряда направлен на восток. Как направлен вектор напряженности электрического поля?

- | | |
|-------------|--------------|
| 1) на юг | 3) на восток |
| 2) на север | 4) на запад |

4. Электрический заряд q_1 находится в электрическом поле заряда q_2 . От чего зависит напряженность электрического поля заряда q_2 в точке пространства, в которую помещен заряд q_1 ?

- 1) только от заряда q_2
- 2) только от заряда q_1
- 3) от заряда q_2 расстояния между зарядами q_1 и q_2
- 4) от заряда q_1 и расстояния между зарядами q_1 и q_2

5. Если потенциал электрического поля на поверхности металлической заряженной сферы радиусом 20 см равен 4 В, то потенциал точки электрического поля на расстоянии 10 см от центра сферы равен

- 1) 8 В
- 2) 4 В
- 3) 2 В
- 4) 1 В

6. Плоский воздушный конденсатор заряжен до разности потенциалов U и отключен от источника тока. Если расстояние между обкладками конденсатора увеличить в k раз, то разность потенциалов станет равной

- 1) $(k-1)U$
- 2) U/k
- 3) $U \cdot k$
- 4) $k^2 U$

7. От водяной капли, обладающей электрическим зарядом $-2e$, отделилась маленькая капля с зарядом $+3e$. Каким стал электрический заряд оставшейся части капли?

- 1) $-e$
- 2) $-5e$
- 3) $+5e$
- 4) $+3e$

8. Напряженность электрического поля на расстоянии 5 см от поверхности заряженной сферы радиусом 10 см равна 36 В/м. Какова напряженность поля на расстоянии 30 см от центра сферы?

- 1) 4 В/м
- 2) 6 В/м
- 3) 9 В/м
- 4) 18 В/м

9. Конденсатор был заряжен до 20 В. При разрядке конденсатора в электрической цепи выделилась энергия 0,1 Дж. Какой заряд был на обкладке конденсатора?

- 1) $5 \cdot 10^{-3}$ Кл
- 2) 0,1 Кл
- 3) $1 \cdot 10^{-3}$ Кл
- 4) $1 \cdot 10^{-2}$ Кл

10. Как изменится емкость плоского воздушного конденсатора при уменьшении в два раза площади его пластин и введении между обкладками диэлектрика с диэлектрической проницаемостью, равной 2? Расстояние между пластинами не изменяется.

- 1) увеличится в 2 раза
- 2) увеличится в 4 раза
- 3) не изменится
- 4) уменьшится в 2 раза

11. К положительному заряду q_1 с большого расстояния приближается на расстояние R отрицательный заряд q_2 . Как изменятся напряженность и потенциал электрического поля в точке на середине расстояния R между зарядами q_1 и q_2 ?

- 1) напряженность и потенциал увеличатся
- 2) напряженность и потенциал уменьшатся
- 3) напряженность уменьшится, потенциал увеличится
- 4) напряженность увеличится, потенциал уменьшится.

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. Три конденсатора емкостями C_1, C_2, C_3 соединены параллельно так, что емкость батареи конденсаторов составляет C , а напряжения и заряды на конденсаторах равны U_1, U_2, U_3 и q_1, q_2, q_3 соответственно. Определите значения величин, обозначенных *.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$C_1, \text{мкФ}$	*	6	4	4	*	12	2	6	*	8	20	10
$C_2, \text{мкФ}$	6	*	8	8	10	*	8	20	10	*	5	6
$C_3, \text{мкФ}$	10	4	*	12	8	10	*	2	20	12	*	4
$C, \text{мкФ}$	20	16	22	*	30	26	12	*	40	30	30	*
$U_1, \text{В}$	*	*	15	*	*	20	*	*	*	*	*	*
$U_2, \text{В}$	*	5	*	*	30	*	*	*	*	*	*	*
$U_3, \text{В}$	10	*	*	40	*	*	*	*	*	*	*	*
$q_1, \text{мкКл}$	*	*	*	*	*	*	40	*	*	160	*	*
$q_2, \text{мкКл}$	*	*	*	*	*	*	*	100	*	*	200	*
$q_3, \text{мкКл}$	*	*	*	*	*	*	*	*	300	*	*	80

Задача 2. Три конденсатора емкостями C_1, C_2, C_3 соединены последовательно так, что емкость батареи конденсаторов составляет C , а напряжения и заряды на конденсаторах равны U_1, U_2, U_3 и q_1, q_2, q_3 соответственно. Определите значения величин, обозначенных *.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$C_1, \text{мкФ}$	8	6	10	*	2	4	4	*	8	6	12	*
$C_2, \text{мкФ}$	6	10	*	10	4	6	*	2	6	4	*	2
$C_3, \text{мкФ}$	4	*	2	8	6	*	8	4	10	*	6	8
$C, \text{мкФ}$	*	2,3	1,4	1,8	**	1,1	1,7	1,0	*	1,9	3,0	0,9
$U_1, \text{В}$	*	*	*	*	*	*	*	20	*	*	50	*
$U_2, \text{В}$	*	*	*	*	*	*	15	*	*	30	*	*
$U_3, \text{В}$	*	*	*	*	*	*	*	*	12	*	*	40
$q_1, \text{мкКл}$	*	30	*	*	20	*	*	*	*	*	*	*
$q_2, \text{мкКл}$	60	*	*	40	*	*	*	*	*	*	*	*
$q_3, \text{мкКл}$	*	*	30	*	*	30	*	*	*	*	*	*

3.5. Энергия конденсатора

Независимо от формы и геометрических размеров конденсаторы обладают энергией. (Дмитриева), которая равна работе внешних сил, которую необходимо затратить для зарядки конденсатора. Вся электрическая энергия конденсатора в пространстве распределится между его обкладками. Ее называют энергией электрического поля.

Формулы для вычисления энергии любого конденсатора (энергии электрического поля):

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C} \quad (21)$$

Зная, что напряженность электрического поля пропорциональна напряжению ($E \sim U$), то можно рассчитать объемную **плотность энергии** электрического поля как отношение потенциальной энергии (W) к объему пространства (V) между обкладками конденсатора:

$$w = \frac{W}{V} = \frac{\varepsilon_0 E^2}{2} \quad (22)$$

Таким образом, объёмная плотность энергии – это фундаментальная величина, показывающая, сколько энергии «запасено» в единице объёма электрического поля.

4. ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

4.1. Электрический ток. Условия существования электрического тока.

Источники тока

Одним из фундаментальных понятий физики является *электрический ток* – это упорядоченное (направленное) движение заряженных частиц.

Условия существования электрического тока:

- ✓ наличие свободных заряженных частиц (носителей заряда);
- ✓ наличие электрического поля (создается источником напряжения);
- ✓ напряженность должна быть постоянной;
- ✓ цепь должна быть замкнута.

Таким образом, необходим материал, содержащий свободные заряженные частицы – *проводник* и материал, в котором свободных зарядов нет или очень мало – *изолятор (диэлектрик)*.

Природа носителей заряда в разных проводниках различна:

- в металлах – это электроны;
- в электролитах – ионы;
- в газах – электроны и ионы;
- в полупроводниках – электроны и дырки.

Электрический ток может возникать в результате различных физических процессов, но для практического изучения наиболее удобным является движение свободных зарядов в проводниках.

Механизм возникновения тока

В отсутствие электрического поля заряды в проводнике движутся хаотично (тепловое движение). При помещении проводника во внешнее электрическое поле на заряды начинает действовать сила $F=q \cdot E$, которая вызывает их упорядоченное движение. Таким образом, в проводнике происходит наложение упорядоченного движения на хаотическое тепловое (рис. 11).

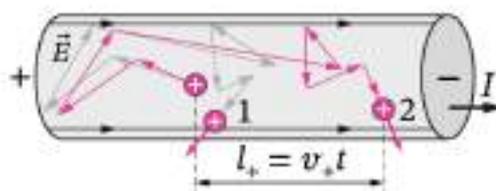


Рис. 11. Наложение упорядоченного движения $+q$ на хаотическое тепловое движение

За направление электрического тока принимается направление упорядоченного движения положительно заряженных частиц (рис. 12).

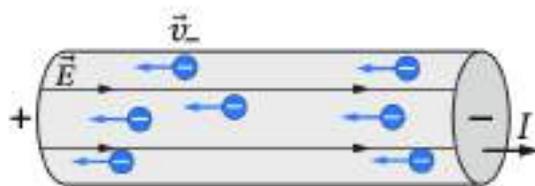


Рис. 12. Ток как направленное движение свободных зарядов

Необходимость источника тока

Как мы узнали из электростатики, перемещение свободных зарядов под действием внешнего поля приводит к появлению индуцированных зарядов, и процесс продолжается до тех пор, пока внутреннее поле не скомпенсирует внешнее. В результате поле внутри проводника становится равным нулю.

Следовательно, для **поддержания электрического тока** необходимо постоянно поддерживать электрическое поле в проводнике. Это эквивалентно существованию постоянного напряжения на его концах.

Устройства, которые совершают работу по поддержанию постоянного электрического поля в проводнике, называются **источниками тока**.

Принцип действия источников тока

В источниках тока электрическое поле создаётся и поддерживается благодаря разделению разноимённых зарядов. В результате на одном полюсе источника накапливаются положительные заряды, на другом – отрицательные (рис. 13). Между полюсами возникает электрическое поле.

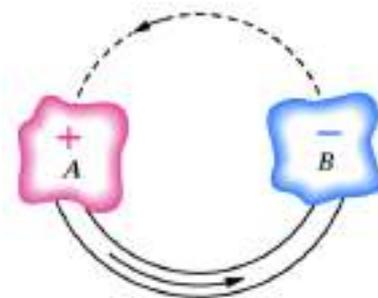


Рис. 13. Возникновение электрического поля

Под действием этого поля в проводнике, соединяющем полюса источника, свободные заряды начинают направленное движение – возникает электрический ток.

Любой источник тока совершает работу против электрического поля, перемещая заряды внутри себя. Эту работу совершают силы неэлектростатического происхождения, которые называются **сторонними силами**.

- Тип сторонних сил служит основой для классификации источников тока:
- В генераторах на электростанциях – вихревое электрическое поле (закон электромагнитной индукции).
 - В химических источниках (аккумуляторы, батарейки) – химические силы.
 - В фотоэлементах – действие света на электроны в металле.

4.2. Измерение тока и напряжения

Количественной характеристикой электрического тока является сила тока.

Сила тока – это скалярная физическая величина, определяющая отношение количества заряда, прошедшего через поперечное сечение проводника за единицу времени:

$$I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t}; \quad I = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad (23)$$

где:

I – сила тока, $[I]=1\text{А}=\text{Кл}/1\text{ с}$ (Ампер).

Виды тока:

- ✓ постоянный (не меняется с течением времени: $I = \text{const}$);
- ✓ переменный.

Если ток переменный, то возможно два варианта: $I > 0$ (если направление тока совпадает с условно выбранным положительным направлением) и $I < 0$ (если – в противоположном направлении). При решении задач и схем используют условное направление электрического тока – от «+» к «-».

Сила тока измеряется **амперметром**, который в цепь включается последовательно с прибором, силу тока которого измеряют. Условное обозначение на схеме:

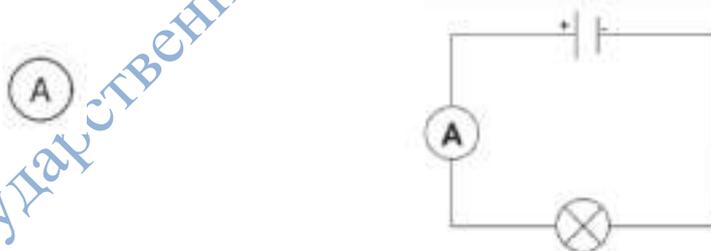


Рис. 14. Обозначение и подключение амперметра

Примеры решения задач

Задача 1. Сила тока, текущего по проводнику, равна 6 А. Какой заряд пройдёт по проводнику за 30 с?

Дано:	Решение:
$I=6\text{А}$	Согласно определению силы тока:
$t=30\text{с}$	$I=q/t$
	Выразим заряд: $q=I \cdot t=6 \cdot 30=180\text{Кл}$
Найти: q -?	Ответ: 180 Кл

Задача 2. На графике показана зависимость силы тока I в проводнике от времени t . Определите заряд, прошедший по проводнику за интервал времени от 0 до 20 с.

<i>Дано:</i>	<i>Решение:</i>
	<p>1. Разобьём график на четыре участка по 5 с каждый. Зависимость силы тока на них от времени линейна. Таким образом, средняя сила тока равна среднему арифметическому значений силы тока в начале и конце участков.</p> <p>2. Найдём средние значения силы тока на каждом участке:</p> $I_1=(0+30)/2=15\text{мА}; I_2=(30+20)/2=25\text{мА}$ $I_3=20+20=20\text{мА}; I_4=20+0=10\text{мА}$ <p>3. Найдём общий заряд:</p> $q=(I_1+I_2+I_3+I_4)\cdot\Delta t=(15+25+20+10)\cdot 10^{-3}\cdot 5=0,35\text{Кл}$
<i>Найти:</i> q -?	<i>Ответ:</i> 0,35 Кл

Задача 3. Почему амперметр подключается к участку цепи последовательно?

Решение: амперметр измеряет силу тока, протекающего через него. При последовательном подключении через амперметр и измеряемый участок протекает одинаковый ток.

Задача 4. За какое время через поперечное сечение проводника протечёт электрический заряд 50 Кл при силе тока 10 мА?

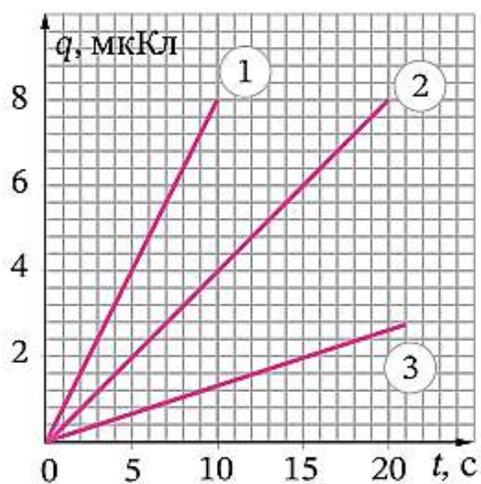
<i>Дано:</i>	<i>Решение:</i>
$q=50\text{Кл}$ $I=10\text{мА}=0,01\text{А}$	$t=q/I=50/0,01=5000\text{с}\approx 1,39\text{ч}$
<i>Найти:</i> t	<i>Ответ:</i> $\approx 1,39\text{ ч}$

Задача 5. Определите показания амперметра, если абсолютная погрешность прямого измерения силы тока равна цене деления амперметра.

<i>Дано:</i>	<i>Решение:</i>
	<p>1. Цена деления: $(0,2-0)/10=0,02\text{А}$</p> <p>2. Показания прибора: $0,4+ 3\cdot 0,02=0,46\text{А}$</p> <p>3. С учётом погрешности: $(0,46\pm 0,02)\text{А}$</p>
<i>Найти:</i> показания амперметра	<i>Ответ:</i> $(0,46\pm 0,02)\text{А}$

Задача 6. Величины зарядов, прошедших через сечения проводников 1, 2 и 3, возрастают с течением времени согласно графику. В каком соотношении находятся силы токов в этих проводниках?

Дано:



Решение:

Все зависимости линейные, значит токи постоянные. Рассчитаем силы токов:

$$I_1 = 8 \cdot 10^{-6} / 10 = 0,8 \text{ мкА} \quad I_2 = 4 \cdot 10^{-6} / 10 = 0,4 \text{ мкА}$$

$$I_3 = 2 \cdot 10^{-6} / 15 \approx 0,13 \text{ мкА}$$

Таким образом, $I_1 > I_2 > I_3$

Найти: соотношение сил I

Ответ: $I_1 > I_2 > I_3$

Задача 7. В результате утечки заряда в пространстве между обкладками конденсатора течёт электрический ток с силой $I = 0,16 \text{ мкА}$. Какое количество электронов переходит с одной обкладки конденсатора на другую за время $t = 1 \text{ мс}$?

Дано:

$$I = 0,16 \text{ мкА} = 1,6 \cdot 10^{-7} \text{ А}$$

$$t = 1 \text{ мс} = 10^{-3} \text{ с}$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

Решение:

1. Суммарный заряд:

$$q = I \cdot t = 1,6 \cdot 10^{-7} \cdot 10^{-3} = 1,6 \cdot 10^{-10} \text{ Кл}$$

2. Число электронов:

$$N = q / e = 1,6 \cdot 10^{-10} / 1,6 \cdot 10^{-19} = 10^9$$

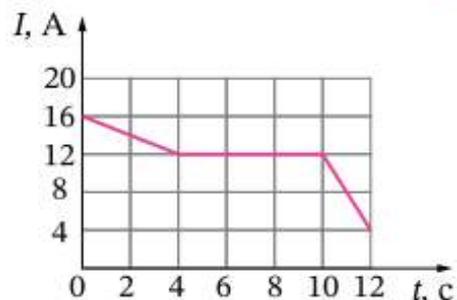
Найти: N ?

Ответ: 10^9

Задачи для самостоятельного решения

1. Сила тока, текущего в проводнике, равна 4 А. Какой заряд проходит через поперечное сечение проводника за 10 с?

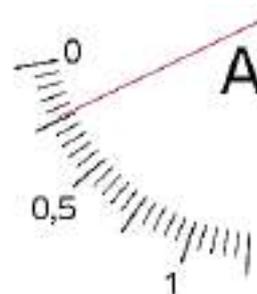
2. На графике рис. 7 показана зависимость силы тока I в проводнике от времени t . Определите заряд, прошедший по проводнику за $\Delta t = 12 \text{ с}$ момента начала отсчёта времени.



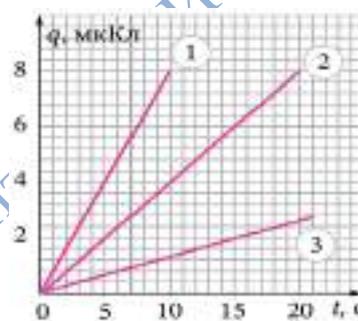
3. В чём заключается основная функция источника тока? Что такое сторонние силы?

4. Сила тока в проводнике 15 мА. За какое время через его поперечное сечение протечёт электрический заряд 60 Кл?

5. Определите показания амперметра, если абсолютная погрешность прямого измерения силы тока равна цене деления амперметра.



6. На графике приведены зависимости величин зарядов, прошедших через сечения проводников 1, 2 и 3, от времени. Определите отношение I_1/I_3 .



7. В результате утечки заряда с поверхности заряженного проводника в окружающее пространство вылетают электроны, создавая при этом электрический ток с силой $I = 16$ мкА. Какое количество электронов покидает поверхность проводника за время $t = 0,1$ мс?

Контрольные вопросы

1. Дайте определение электрического тока, запишите её формулу и единицы измерения.

2. Какие условия необходимы для существования электрического тока?

3. Как определяется направление электрического тока?

Если требуется измерить силу тока большую предельно допустимого значения силы тока, то параллельно амперметру присоединяют проводник, по которому будет проходить некоторая часть измеряемого тока – **шунт**. Тогда добавление шунта разделит ток на две составляющие – I_a и $I_{ш}$.

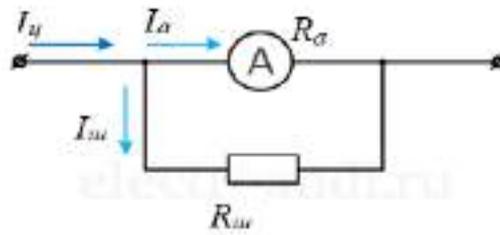


Рис. 15. Обозначение шунта в цепи

Формула расчета сопротивления шунта:

$$R_{\text{ш}} = \frac{R_a \cdot I_a}{I_{\text{ц}} - I_a} = \frac{R_a}{n - 1} \quad (24)$$

где n – число раз увеличения диапазона измерения амперметра ($n = I_{\text{ц}} / I_a$)

Измерить напряжение можно с помощью прибора – **вольтметра**, который подключается параллельно к тому участку цепи или элементу, на котором нужно измерить напряжение.

Условное обозначение на схеме:

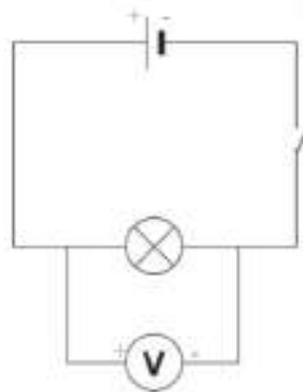


Рис. 16. Обозначение и подключение вольтметра

В случаях, когда необходимо измерить напряжение, превышающее максимально допустимое для вольтметра, в цепь последовательно с ним включают **добавочный резистор (добавочное сопротивление)**.

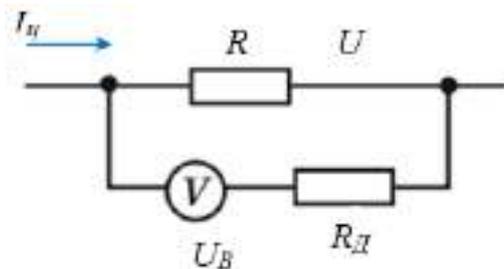


Рис. 17. Обозначение добавочного сопротивления в цепи

Формула расчета добавочного сопротивления ($n = U / U_B$):

$$R_D = \frac{U - U_B}{U_B} \cdot R_B = (n - 1) \cdot R_B \quad (25)$$

4.3. Закон Ома для участка цепи. Электрическое сопротивление

Фундаментальный закон физики, который описывает взаимосвязь между напряжением, силой тока и сопротивлением на участке электрической цепи, это Закон Ома, который был экспериментально установлен немецким физиком Георгом Омом в 1826 году и назван в его честь. Коэффициент R в формуле закона Ома характеризует свойство проводника препятствовать прохождению электрического тока и называется **электрическим сопротивлением**.

Закон Ома: Сила тока в проводнике прямо пропорциональна напряжению на его концах и обратно пропорциональна его сопротивлению.

$$I = \frac{U}{R} \quad (26)$$

где:

I – сила тока, $[I]=1\text{A}$ (Ампер);

U — напряжение, $[U]=1\text{В}$ (Вольт);

R — сопротивление, $[R]=1\text{Ом}$ (Ом, Ω).

Зависимость силы тока I от напряжения U можно представить графически. Для проводника, подчиняющегося закону Ома, этот график выглядит следующим образом и называется **вольт-амперная характеристика** (ВАХ). Прямая линия, проходящая через ноль, — это отличительный признак омического проводника.

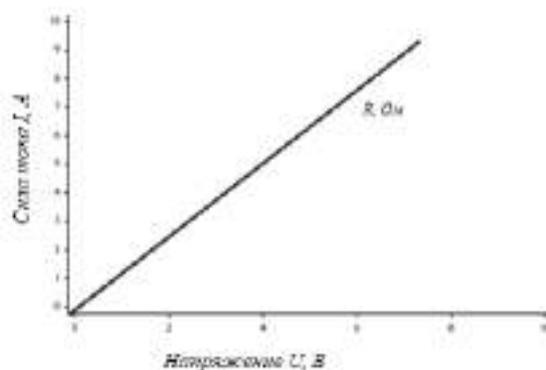


Рис. 18. Вольт-амперная характеристика

Электрическое сопротивление — это физическая величина, которая характеризует свойство материала или проводника препятствовать прохождению электрического тока. Обычно говорят не просто о сопротивлении, а о сопротивлении проводника, которое можно рассчитать по формуле:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (27)$$

Сопротивление проводника зависит от:

- ✓ материала проводника (у каждого материала свое **удельное сопротивление** – это физическая величина, которая характеризует способность материала проводить электрический ток, $[\rho] = \text{Ом} \cdot \text{м}$;
- ✓ длины проводника, l (чем длиннее, тем больше сопротивление);
- ✓ площади поперечного сечения, S (чем толще провод, тем меньше сопротивление);
- ✓ температуры проводника (для металлов при нагреве сопротивление увеличивается).

Формула расчета удельного сопротивления:

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l} \quad (28)$$

Таблица 3.

Удельные сопротивления различных веществ (при 20°C)

Вещество	Удельное сопротивление, Ом·м
Серебро	$1,6 \times 10^{-8}$
Медь	$1,7 \times 10^{-8}$
Графит	3×10^{-8}
Кремний	10^3
Вода (химически чистая)	10^6
Фарфор	10^{13}

Удельное сопротивление чистых металлов очень мало. Механическая и термическая обработка, а также примеси значительно влияют на сопротивление. Наибольшим сопротивлением обладают сплавы.

Например, константан (сплав меди и никеля) имеет $\rho \approx 4,4 \times 10^{-7} \text{ м}\cdot\text{м}$, что значительно больше, чем у чистой меди ($1,7 \times 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$).

В нагревательных приборах широко используется нихром ($\rho \approx 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$).

Диэлектрики обладают очень большим, но конечным сопротивлением, поэтому при определённых условиях через них может протекать ток.

Удельное сопротивление зависит от температуры: у металлов оно увеличивается с ростом температуры, а у электролитов – уменьшается.

Зависимость сопротивления от длины проводника используется в **реостате** – приборе для регулирования силы тока в цепи. Основным элементом рео-

стата – проволочная катушка. Перемещая подвижный контакт, можно изменять длину участка цепи, по которому течёт ток, тем самым плавно меняя её общее сопротивление.

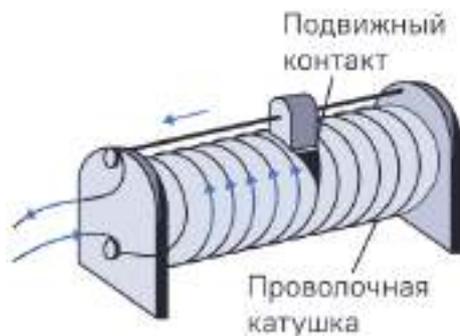


Рис. 18. Внешний вид реостата

Примеры решения задач

Задача 1. Какая работа совершается при прохождении заряда 60 Кл через проводник, если напряжение на его концах равно 150 В?

<i>Дано:</i>	<i>Решение:</i>
$q=60\text{Кл}$ $U=150\text{В}$	Из определения напряжения: $U=A/q$ находим: $A=U \cdot q=150 \cdot 60=9000\text{Дж.}$
<i>Найти:</i> A -?	<i>Ответ:</i> 9000 Дж

Задача 2. Напряжение на концах проводника 6 В. Какова сила тока в проводнике, если за 25 с совершена работа 600 Дж?

<i>Дано:</i>	<i>Решение:</i>
$A=600\text{Дж};$ $U=6\text{ В};$ $t=25\text{с}$	Найдём величину заряда: $q=A/U=600/6=100\text{Кл.}$ Сила тока: $I=q/t=100/25=4\text{А}$
<i>Найти:</i> I -?	<i>Ответ:</i> 4 А

Задача 3. Во сколько раз отличаются сопротивления двух медных проводов, если один из них имеет в 4 раза большую длину и в 2 раза большую площадь поперечного сечения, чем другой?

<i>Дано:</i>	<i>Решение:</i>
$l_1=4l,$ $S_1=2S.$	$R_1=\rho l_1/S_1=\rho 4l/2S=2 \cdot \rho l/S;$ $R_2=\rho l/S$ $R_1/R_2=(2 \cdot \rho l/S)/(\rho l/S)=2$
<i>Найти:</i> R_1/R_2 -?	<i>Ответ:</i> сопротивление первого провода в 2 раза больше

Задача 4. Определите удельное сопротивление проводника длиной 1,5 м и площадью поперечного сечения 0,5 мм², если его сопротивление равно 2 Ом.

<i>Дано:</i>	<i>Решение:</i>
$l=1,5\text{ м};$ $S=0,5\text{ мм}^2=0,5\times 10^{-6}\text{ м}^2$ $R=2\text{ Ом}$	$\rho=R\cdot S/l=2\cdot 0,5\times 10^{-6}\cdot 1,5\approx 6,7\times 10^{-7}\text{ Ом}\cdot\text{м}$
<i>Найти:</i> ρ -?	<i>Ответ:</i> $6,7\times 10^{-7}\text{ Ом}\cdot\text{м}$

Задача 5. Найдите массу и сопротивление медных проводов для проводки в помещении, если площадь поперечного сечения провода $1,5\text{ мм}^2$, а длина проводки 120 м . Плотность меди $\rho_{\text{меди}}=8960\text{ кг/м}^3$, удельное сопротивление $\rho=0,017\text{ Ом}\cdot\text{мм}^2$.

<i>Дано:</i>	<i>Решение:</i>
$S=1,5\text{ мм}^2$ $l=120\text{ м}$ $\rho_{\text{меди}}=8960\text{ кг/м}^3$ $\rho_{\text{уд}}=0,017\text{ Ом}\cdot\text{м}$	Сопротивление: $R=\rho_{\text{уд}}l/S=0,017\cdot 120\cdot 1,5=1,36\text{ Ом}$. Масса: переведем площадь в м^2 : $S=1,5\times 10^{-6}\text{ м}^2$. $V=S\cdot l=1,5\times 10^{-6}\cdot 120=1,8\times 10^{-4}\text{ м}^3$. $m=\rho_{\text{меди}}\cdot V=8960\cdot 1,8\times 10^{-4}\approx 1,613\text{ кг}$.
<i>Найти:</i> m, R -?	<i>Ответ:</i> $R=1,36\text{ Ом}; m\approx 1,61\text{ кг}$

Задача 6. Через проводник длиной 12 м и площадью поперечного сечения $1,2\text{ мм}^2$ под напряжением 120 В протекает ток 2 А . Определите удельное сопротивление материала проводника.

<i>Дано:</i>	<i>Решение:</i>
$S=1,2\text{ мм}^2$ $l=12\text{ м};$ $U=120\text{ В};$	<i>определим сопротивление по закону Ома:</i> $R=U/I=120/2=60\text{ Ом}$. $\rho=R\cdot S/l=60\cdot 1,2\times 10^{-6}/12=6\times 10^{-6}\text{ Ом}\cdot\text{м}$
<i>Найти:</i> ρ -?	<i>Ответ:</i> $\rho=6\times 10^{-6}\text{ Ом}\cdot\text{м}$

Задача 7. Определите длину проводника площадью сечения $0,8\text{ мм}^2$ из сплава с удельным сопротивлением $2,1\times 10^{-6}\text{ Ом}\cdot\text{м}$, если при напряжении 8 В сила тока в нём равна 1 А .

<i>Дано:</i>	<i>Решение:</i>
$S=0,8\text{ мм}^2$ $I=1\text{ А}$ $U=8\text{ В};$ $\rho=2,1\times 10^{-6}\text{ Ом}\cdot\text{м}$	<i>определим сопротивление по закону Ома:</i> $R=U/I=8/1=8\text{ Ом}$. $l=R\cdot S/\rho=8\cdot 0,8\times 10^{-6}/2,1\times 10^{-6}=3,05\text{ м}\approx 3\text{ м}$
<i>Найти:</i> l	<i>Ответ:</i> 3 м

Задачи для самостоятельного решения

1. Чему равно напряжение на участке цепи, если при прохождении заряда 40 Кл совершается работа 900 Дж ?
2. Чему равно напряжение на участке цепи, если при силе тока 1 А за 2 минуты совершается работа 600 Дж ?

3. Первый отрезок проволоки в 7 раз длиннее второго, но имеет в 3 раза меньшую площадь поперечного сечения. Чему равно отношение сопротивлений первого и второго отрезков?

4. Константиновая проволока длиной 18 м и площадью сечения 0,75 мм² имеет сопротивление 12 Ом. Чему равно удельное сопротивление константана?

5. Необходимо изготовить провод длиной 200 м и сопротивлением 2 Ом. В каком случае масса провода будет меньше и во сколько раз – если его сделать из алюминия или из меди? (Используйте справочные данные по удельному сопротивлению и плотности меди и алюминия).

6. Рассчитайте силу тока в медном проводе длиной 50 м и площадью сечения 0,75 мм² при напряжении 9 В.

7. К источнику тока с напряжением 8 В подключили никелиновую проволоку длиной 50 см и сечением 0,2 мм². Какова сила тока в цепи?

4.4. Электродвижущая сила. Закон Ома для полной электрической цепи

Заряды двигаются в цепи, преодолевая сопротивление благодаря электродвижущей силе (ЭДС). **Электродвижущая сила** – это фундаментальная характеристика источника тока, которая определяет его способность создавать и поддерживать электрический ток в цепи. Определяют как отношение сторонних сил по перемещению положительного электрического заряда к величине этого заряда.

Сторонние силы — силы неэлектрической природы, которые разделяют заряды внутри источника.

Рассчитывают по формуле:

$$\varepsilon = \frac{A_{см}}{\Delta q} \quad (29)$$

где:

ε – ЭДС (электродвижущая сила) источника тока, [ε] = 1В (Вольт);

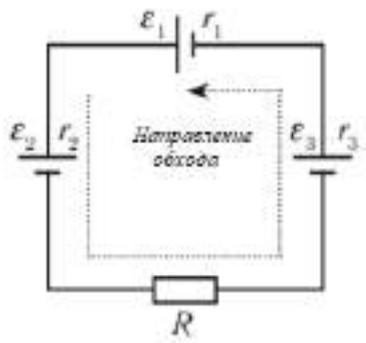
$A_{см}$ – работа сторонних сил, [$A_{см}$] = Дж (Джоуль);

Δq – величина заряда, [q] = 1Кл.

Если требуется найти общую ЭДС цепи, необходимо просуммировать ЭДС всех отдельных источников тока $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ (элементов):

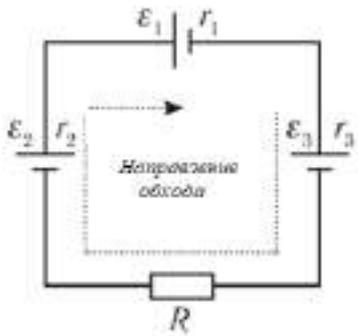
$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots + \varepsilon_n \quad (30)$$

При этом необходимо учитывать направление (полярность) включения каждого источника. Если направления ЭДС совпадают, их значения складываются, если противоположны – вычитаются.



$$\varepsilon_1 > 0, \varepsilon_2 < 0, \varepsilon_3 > 0$$

$$\varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3$$



$$\varepsilon_1 < 0, \varepsilon_2 > 0, \varepsilon_3 < 0$$

$$\varepsilon = -\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_3$$

Рис. 19. Направление обхода ЭДС

Правило работает только для последовательного соединения источников (когда они соединены в цепь друг за другом). При параллельном соединении цель иная – не увеличение напряжения, а увеличение срока службы или силы тока, и общая ЭДС в этом случае равна ЭДС одного источника.

Сопротивление, которое возникает внутри самого источника тока (батареи, аккумулятора, генератора) при прохождении через него электрического тока называется **внутренним сопротивлением**. Обозначается r , $[r]=1\text{ Ом}$.

Для полной (замкнутой) цепи внутреннее сопротивление источника тока учитывается, так же как и сопротивление внешней цепи (нагрузки). Закон Ома для полной цепи устанавливает зависимость силы тока в цепи от электродвижущей силы (ЭДС) источника и общего сопротивления цепи, включая как внешнее сопротивление нагрузки, так и внутреннее сопротивление самого источника.

Закон Ома для полной (замкнутой) цепи: сила тока в полной цепи прямо пропорциональна электродвижущей силе (ЭДС) источника тока и обратно пропорциональна сумме сопротивлений внешней и внутренней частей цепи:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r} \quad (31)$$

где:

I – сила тока в цепи, $[I]=\text{А}$;

ε – ЭДС, $[\varepsilon]=1\text{В}$ (Вольт);

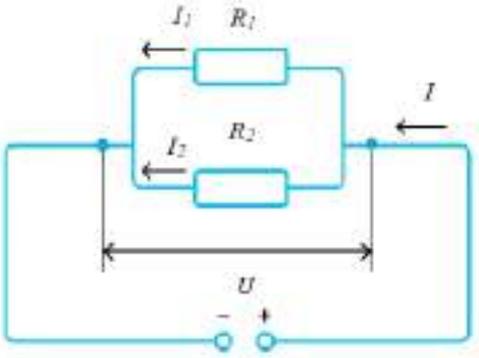
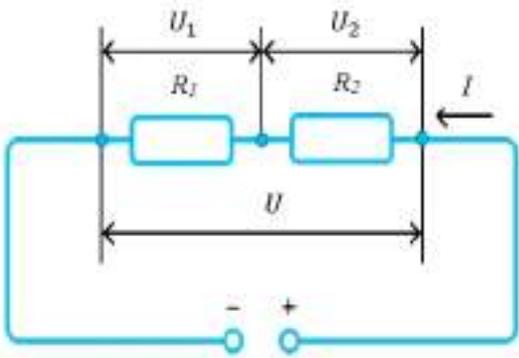
R – сопротивление внешней цепи (нагрузки) $[R]=\text{Ом}$;
 r – внутреннее сопротивление источника тока $[r]=\text{Ом}$;
 $R+r$ – полное сопротивление цепи.

4.5. Соединения проводников:

последовательное, параллельное и смешанное

От источника тока энергия может быть передана по проводам к устройствам, потребляющим энергию: электрической лампе, радиоприёмнику и др. Для этого составляют электрические цепи различной сложности [7, с. 338]. К наиболее простым и основным способам соединения проводников относятся *последовательное* и *параллельное соединения*.

Схемы соединения проводников:

Параллельное соединение	Последовательное соединение
	
$I = I_1 + I_2, \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$	$I = I_1 = I_2$
$U = U_1 = U_2$	$U = U_1 + U_2, \quad \frac{U_2}{U_1} = \frac{R_2}{R_1}$
$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ $R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$, если два резистора	$R = R_1 + R_2$
Для N одинаковых резисторов с сопротивлением R	
$R_{\text{общ}} = \frac{R}{N}$	$R_{\text{общ}} = N \cdot R$

Последовательное соединение применяйте, когда требуется:

- ✓ увеличить напряжение;

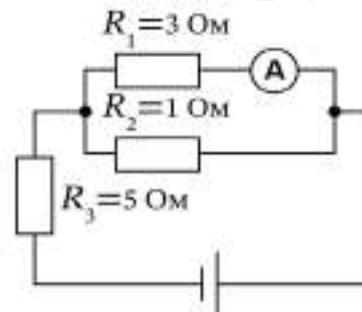
- ✓ получить более высокое напряжение на нагрузке.
Параллельное соединение применяйте, когда требуется:
- ✓ увеличить срок службы батареи;
- ✓ обеспечить большой ток нагрузки.

Необходимо учитывать, что при параллельном соединении общее сопротивление уменьшается, а при последовательном – увеличивается.

В зависимости от типа соединения рассчитывают эквивалентное сопротивление цепи.

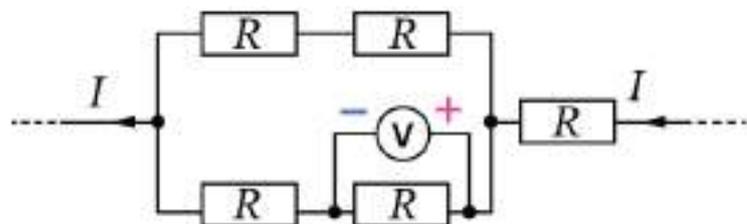
Примеры решения задач

Задача 1. В цепи, изображённой на рисунке, амперметр показывает 1 А. Найдите напряжение на резисторе R_2 . Амперметр считать идеальным.



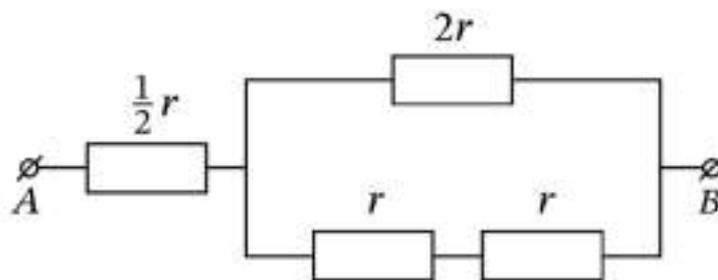
Дано:	Решение:
$R_1=3 \text{ Ом};$ $R_2=1 \text{ Ом};$ $R_3=5 \text{ Ом};$ $I_A=1 \text{ А};$	Так как амперметр идеальный, его сопротивление равно нулю. Резисторы R_1 и R_2 соединены параллельно, поэтому напряжения на них равны: $U_1=U_2$. Напряжение на R_1 находим по закону Ома: $U_1=I_A \cdot R_1=1 \cdot 3=3 \text{ В};$ Так как $U_1=U_2$, следовательно, $U_2=3 \text{ В}$.
Найти: U_2 -?	Ответ: 3В.

Задача 2. Пять одинаковых резисторов сопротивлением 1 Ом соединены в цепь, через которую течёт ток $I=2 \text{ А}$. Какое напряжение показывает идеальный вольтметр?



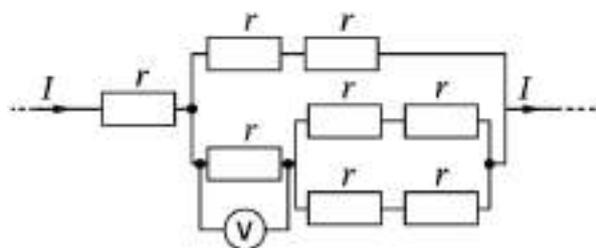
<i>Дано:</i>	<i>Решение:</i>
$R=1\text{ Ом};$ $I=2\text{ А};$	В силу симметрии схемы и идеальности вольтметра, ток в ветви с вольтметром равен $I/2=1\text{ А}$. Вольтметр показывает напряжение на резисторе, к которому подключён параллельно. По закону Ома: $U_V=I\cdot R=1\cdot 1=1\text{ В}$
<i>Найти:</i> U_V -?	<i>Ответ:</i> 1 В

Задача 4. На рисунке показан участок цепи AB . Каково его сопротивление, если $r=2\text{ Ом}$?



<i>Дано:</i>	<i>Решение:</i>
$r=2\text{ Ом}$	1) Два нижних резистора соединены последовательно: $R_{\text{посл}}=r+r=2r$. 2) Получившееся сопротивление $2r$ соединено параллельно с резистором $2r$: $R_{\text{пар}}=2r\cdot 2r/(2r+2r)=r$ 3) Этот участок соединён последовательно с ещё одним резистором $1/2r$: $R_0=1/2r+r=1/2\cdot 2+2=3\text{ Ом}$
<i>Найти:</i> U_V -?	<i>Ответ:</i> 3 Ом

Задача 5. Восемь одинаковых резисторов ($r=1\text{ Ом}$) соединены в цепь с током $I=4\text{ А}$ (рис. 18). Какое напряжение показывает идеальный вольтметр?



<i>Дано:</i>	<i>Решение:</i>
$r=1\text{ Ом}$ $I=4\text{ А}$	1. Рассмотрим нижний участок цепи с двумя параллельными ветвями (каждая из двух последовательных резисторов) имеет сопротивление r . Общее сопротивление этой ветви составит: $r_{1,4}=2r\cdot 2r/(2r+2r)=r$

2. Так как в параллельных ветвях получились одинаковые сопротивления, значит, значение тока будет одинаково в каждой ветви и равно $I_{1,2} = 2 \text{ A}$.

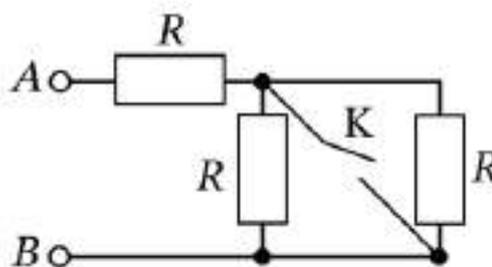
3. Вольтметр показывает напряжение:

$$U_V = 2 \cdot 1 = 2 \text{ В}$$

Найти: U_V

Ответ: 2 В

Задача 6. На сколько уменьшится сопротивление участка цепи AB , если ключ замкнуть? Сопротивление каждого резистора $R = 2 \text{ Ом}$.



Дано:

Решение:

$R = 2 \text{ Ом}$

1) До замыкания ключа: Два резистора соединены параллельно ($R_{\text{пар}} = R/2$), и эта группа подключена последовательно с третьим резистором:

$$R_1 = R + R/2 = 3/2R = 3 \text{ Ом}$$

2) После замыкания ключа: ток не идет через закороченные резисторы, поэтому общее сопротивление равно сопротивлению одного резистора: $R_2 = R = 2 \text{ Ом}$

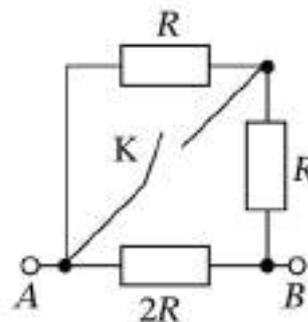
3) Изменение сопротивления:

$$\Delta R = R_1 - R_2 = 3 - 2 = 1 \text{ Ом}$$

Найти: ΔR -?

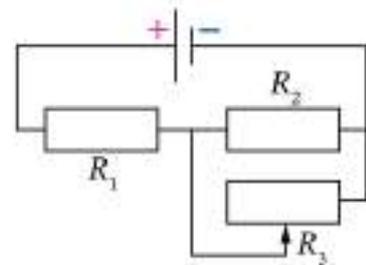
Ответ: 1 Ом

Задача 7. Насколько уменьшится сопротивление участка цепи AB , если ключ K замкнуть? Сопротивление $R = 3 \text{ Ом}$.



<i>Дано:</i>	<i>Решение:</i>
$R=3\text{ Ом}$	<p>1. До замыкания: два резистора R, соединённые последовательно ($2R$), подключены параллельно к резистору $2R$: $R_1=2R \cdot 2R / (2R+2R)=R=3\text{ Ом}$</p> <p>2. После замыкания: схема превращается в параллельное соединение резисторов R и $2R$: $R_2=R \cdot 2R / (R+2R)=2\text{ Ом}$</p> <p>Изменение сопротивления: $\Delta R=R_1-R_2=3-2=1\text{ Ом}$</p>
<i>Найти: ΔR</i>	<i>Ответ: 1 Ом</i>

Задача 8. Как изменится сила тока через резистор R_2 (рис. 21), если в цепи с источником напряжения ползунок реостата переместить вправо?



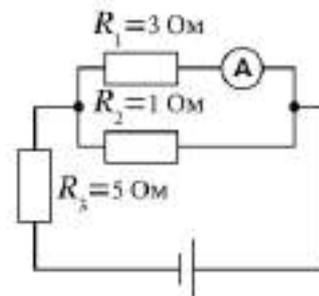
Решение:

1. При перемещении ползунка вправо длина рабочей части реостата уменьшается, следовательно, уменьшается его сопротивление R_3 .
2. Сопротивление параллельного участка R_2 и R_3 уменьшается, что приводит к уменьшению общего сопротивления всей цепи.
3. По закону Ома для полной цепи, при постоянном напряжении источника уменьшение общего сопротивления приводит к увеличению общего тока I в цепи.
4. Увеличение общего тока приводит к большему падению напряжения на резисторе R_1 . Так как напряжение источника постоянно, напряжение на параллельном участке (и, следовательно, на R_2) уменьшается.
5. Поскольку сопротивление R_2 постоянно, а напряжение на нём уменьшилось, сила тока через R_2 также уменьшится.

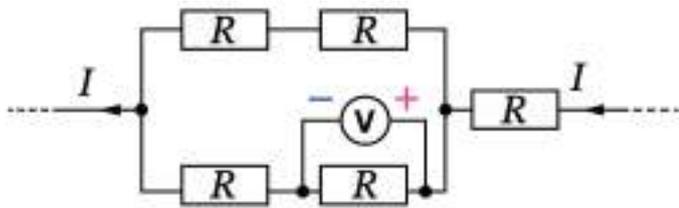
Ответ: Сила тока через резистор R_2 уменьшится.

Задачи для самостоятельного решения

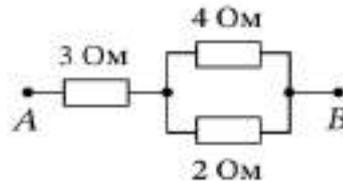
Задача 1. В цепи, изображённой, амперметр показывает 1 А. Найдите силу тока через резистор R_3 . Амперметр считать идеальным.



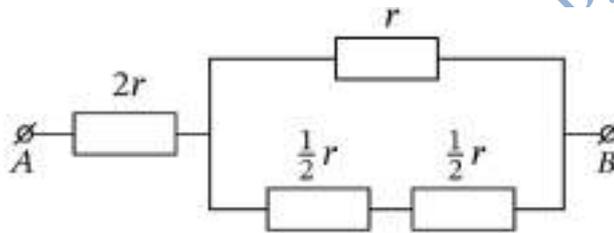
Задача 2. Пять одинаковых резисторов по 25 Ом каждый соединены в цепь с током $I=4\text{А}$. Какое напряжение показывает идеальный вольтметр?



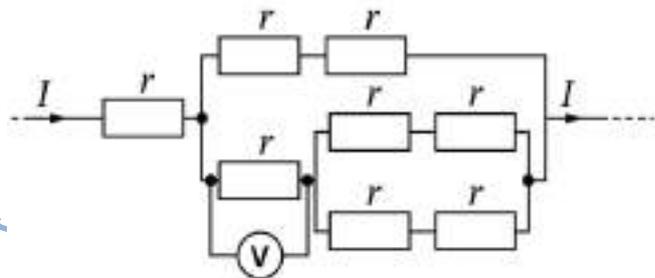
Задача 3. Определите сопротивление между точками A и B для участка цепи на рисунке.



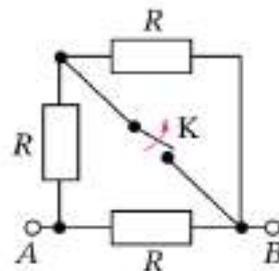
Задача 4. На рисунке показан участок цепи AB . Каково его сопротивление, если $r=30\text{Ом}$?



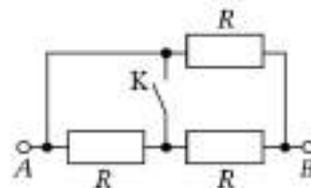
Задача 5. Восемь одинаковых резисторов ($r=1\text{Ом}$) соединены в цепь с током $I=8\text{А}$. Какое напряжение показывает идеальный вольтметр?



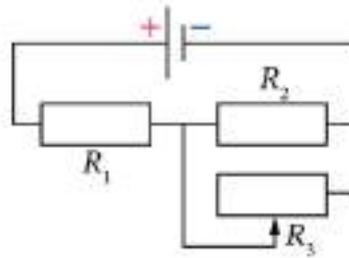
Задача 6. На сколько увеличится сопротивление участка цепи AB , если ключ K разомкнуть? Сопротивление $R=6\text{Ом}$.



Задача 7. На сколько уменьшится сопротивление участка цепи AB после замыкания ключа K , если сопротивление каждого резистора $R=6\text{Ом}$?



Задача 8. Как изменится напряжение на резисторе R_1 , если ползунок реостата R_3 переместить влево?



Задачи для контрольного решения

Задача 1. Три резистора сопротивлениями R_1, R_2, R_3 соединены последовательно так, что общее сопротивление данного участка цепи составляет R , а значения напряжения на резисторах и силы в них равны U_1, U_2, U_3 и I_1, I_2, I_3 соответственно. Определите значения величин, обозначенных *.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$R_1, \text{кОм}$	2	4	6	*	3	5	7	*	11	12	15	*
$R_2, \text{кОм}$	*	6	8	10	*	7	9	11	*	15	20	25
$R_3, \text{кОм}$	6	*	10	12	7	*	11	12	15	*	25	30
$R, \text{кОм}$	10	18	*	30	15	21	*	32	38	47	*	75
$U_1, \text{В}$	*	*	*	*	12	*	*	*	*	*	60	*
$U_2, \text{В}$	*	*	16	*	*	*	*	*	24	*	*	*
$U_3, \text{В}$	3	*	*	*	*	*	10,5	*	*	*	*	*
$I_1, \text{мА}$	*	*	*	3	*	*	*	*	*	3	*	*
$I_2, \text{мА}$	*	1	*	*	*	*	*	1	*	*	*	*
$I_3, \text{мА}$	*	*	*	*	*	5	*	*	*	*	*	5

Задача 2. Три резистора сопротивлениями R_1, R_2, R_3 соединены параллельно так, что общее сопротивление данного участка цепи составляет R , а значения напряжения на резисторах и силы в них равны U_1, U_2, U_3 и I_1, I_2, I_3 соответственно. Определите значения величин, обозначенных *.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$R_1, \text{Ом}$	4,0	8,0	2,0	*	6,0	8,0	20	*	6,0	6,0	20	*
$R_2, \text{Ом}$	6,0	6,0	*	20	10	10	*	4,0	4,0	4,0	*	6,0
$R_3, \text{Ом}$	6,0	*	6,0	10	4,0	*	10	6,0	8,0	*	10	10
$R, \text{Ом}$	*	1,85	1,0	4,0	*	2,55	2,86	1,71	*	1,09	4,0	1,94
$U_1, \text{В}$	*	*	*	*	*	16	*	*	*	*	*	20
$U_2, \text{В}$	*	*	*	10	*	*	*	*	*	24	*	*
$U_3, \text{В}$	*	6,0	*	*	*	*	*	12	*	*	*	*
$I_1, \text{А}$	*	*	1,0	*	*	*	*	*	0,4	*	*	*
$I_2, \text{А}$	*	*	*	*	1,2	*	*	*	*	*	0,5	*
$I_3, \text{А}$	2,0	*	*	*	*	*	1,5	*	*	*	*	*

Когда в цепи одни резисторы соединены последовательно, а другие – параллельно, такое соединение называется **смешанным**.

Для расчета таких схем применим следующий алгоритм:

- ✓ проанализировать схему и разбить ее на участки: найти группы резисторов, соединенных только последовательно или только параллельно;
- ✓ упростить схему (рассчитать эквивалентные сопротивления): пошагово заменять группы резисторов на один эквивалентный ($R_{\text{ЭКВ}}$), используя формулы для последовательного и параллельного соединения;
- ✓ найти общее сопротивление цепи (C);
- ✓ использовать закон Ома для полной цепи: найти общую силу тока в цепи ($I_{\text{общ}}$);
- ✓ «развернуть» схему обратно: двигаясь от упрощенной схемы к исходной, используя законы последовательного и параллельного соединений, найти силы токов и напряжения на каждом резисторе.

Рассмотрим схему, состоящую из 6 проводников. Требуется определить эквивалентное сопротивление.

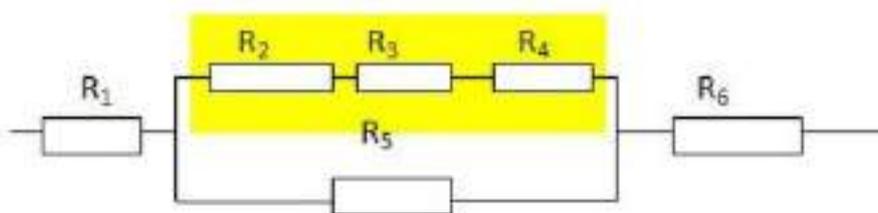


Рис. 20. Смешанное соединение проводников

Рассмотрим этапы преобразования схемы:

<p>R_2, R_3, R_4 соединены параллельно:</p> $R_{2,3,4} = R_2 + R_3 + R_4$	
<p>$R_{2,3,4}$ и R_5 соединены параллельно:</p> $R_{2,3,4} R_5 = \frac{R_{2,3,4} \cdot R_5}{R_{2,3,4} + R_5}$	
$R_{\text{ЭКВ}} = R_1 + R_{2,3,4} + R_6$	$R_{\text{ЭКВ}} - ?$

Возможно соединение проводников, когда разность потенциалов между точками 1 и 2 равна нулю, то ток по этому участку не идёт (в нашем случае по R_3).



Рис. 21. Схема смешанного соединения проводников

Когда необходимо рассчитать сложные электрические цепи, которые нельзя свести к простым последовательным и параллельным соединениям используют правила (законы) Кирхгофа. При этом необходимо учитывать, что **узел** – это точка цепи, где сходится не менее трёх проводников. Условно принимают, что токи, входящие в узел, – положительные (+I), а выходящие – отрицательные (-I). **Контур** – это любой замкнутый путь, проходящий по нескольким ветвям.

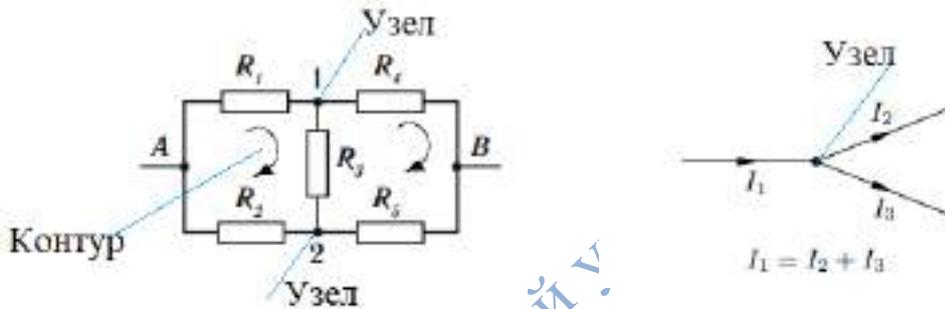


Рис. 22. Элементы сложной цепи

Первое правило Кирхгофа (Правило токов): Алгебраическая сумма сил токов, сходящихся в узле, равна нулю:

$$I_1 + I_2 + \dots + I_n = 0 \quad (32)$$

Второе правило Кирхгофа (Правило напряжений): Алгебраическая сумма ЭДС в любом замкнутом контуре цепи равна алгебраической сумме произведений сил токов на сопротивления соответствующих участков этого контура (падений напряжений на всех сопротивлениях этого контура):

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots + \varepsilon_n = I_1 R_1 + I_2 R_2 + \dots + I_n R_n \quad (33)$$

4.6. Работа и мощность электрического тока

Физическая величина, которая показывает, какое количество электрической энергии преобразовалось в другие виды энергии (тепловую, световую, механическую) на участке цепи за определенное время, называется **работой тока** – это произведение напряжения на ток и на время, в течение которого ток протекает. Вычисляется по формуле:

$$A = UIt \quad (34)$$

где:

A – работа тока, $[A]=\text{Дж}$;

I – сила тока в цепи, $[I]=\text{А}$;

U – напряжение на участке цепи, $[U]=1\text{В}$ (Вольт);

t – время протекания тока, $[t]=\text{с}$.

Применяя формулы Закона Ома, получим:

Работа тока для участка цепи:
$$A = I^2 R t = \frac{U^2 t}{R} \quad (35)$$

Работа тока в замкнутой цепи:
$$A = \varepsilon I t = \varepsilon q = I^2 (R + r) t = \frac{\varepsilon^2 t}{R + r} \quad (36)$$

Физическая величина, которая характеризует скорость преобразования энергии и показывает, какую работу совершает ток за единицу времени, называется **мощностью тока** – это отношению работы тока ко времени, в течение которого она совершается. Вычисляется по формуле:

$$P = \frac{A}{t} = U I \quad (37)$$

где:

P – мощность тока, $[P]=\text{Вт}$ (Ватт);

A – работа тока, $[A]=\text{Дж}$;

U – напряжение на участке цепи, $[U]=1\text{В}$ (Вольт);

t – время протекания тока, $[t]=\text{с}$.

Формула для вычисления:

Мощность электрического тока на участке цепи:
$$P = UI = \frac{U^2}{R} = I^2 R \quad (38)$$

Мощность электрического тока в замкнутой цепи:
$$P = \frac{qU}{t} = \frac{\varepsilon^2 R}{(R + r)^2} \quad (39)$$

Чтобы рассчитать полную мощность источника тока (всей замкнутой цепи) применяют закон Ома:

Мощность, создаваемая источником:
$$P_{\text{ист}} = \varepsilon I = \frac{\varepsilon^2}{R + r} \quad (40)$$

Мощность, выделяемая на внешней цепи:
$$P_{\text{внеш}} = I^2 R = \frac{\varepsilon^2 R}{(R + r)^2} \quad (41)$$

Мощность, выделяемая внутри источника:
$$P_{\text{внут}} = I^2 r = \frac{\varepsilon^2 r}{(R + r)^2} \quad (42)$$

Ток совершает работу против сил сопротивления, что приводит к выделению тепла в проводнике. Это описывается законом Джоуля-Ленца.

Закон Джоуля-Ленца: Количество теплоты, выделяющееся в проводнике, прямо пропорционально квадрату силы тока, сопротивлению проводника и времени прохождения тока.

$$Q = I^2 R t \quad (43)$$

где:

Q – количество теплоты, $[Q]=\text{Дж}$ (Джоуль);

I – сила тока, $[I]=\text{А}$;

R – сопротивление проводника, $[R]=\text{Ом}$;

t – время протекания тока, $[t]=\text{с}$.

Чтобы определить какая доля общей энергии, вырабатываемой источником, расходуется на полезную работу во внешней цепи, определяют **коэффициент полезного действия (КПД) источника тока** – это отношение полезной работы, выполненной источником, к общей работе, которую он производит:

$$\eta = \frac{A_{\text{пол}}}{A_{\text{затр}}} \cdot 100\% = \frac{P_{\text{пол}}}{P_{\text{затр}}} = \frac{U}{\varepsilon} \cdot 100\% = \frac{\varepsilon^2}{R+r} \cdot 100\% \quad (44)$$

η – КПД (коэффициент полезного действия), $[\eta]=\%$;

P – полезная мощность, $[P_{\text{пол}}]=\text{Вт}$ (Ватт);

P – затраченная мощность, $[P_{\text{затр}}]=\text{Вт}$ (Ватт).

Задания для самостоятельного решения

1. Какая формула выражает закон Ома для участка цепи?

А) $I=U/R$

С) $R=U/I$

В) $U=IR$

Д) Все вышеперечисленные

2. Что такое ЭДС (электродвижущая сила) источника?

А) Разность потенциалов на клеммах источника при разомкнутой цепи

В) Сила, которая перемещает заряды внутри источника

С) Сопротивление источника

Д) Мощность источника

3. Какое из следующих утверждений верно для последовательного соединения резисторов?

А) Общее сопротивление равно сумме сопротивлений всех резисторов

В) Общее сопротивление равно произведению сопротивлений всех резисторов

С) Общее сопротивление равно среднему арифметическому сопротивлений всех резисторов

Д) Общее сопротивление равно разности сопротивлений всех резисторов

4. Какое из следующих утверждений верно для параллельного соединения резисторов?

А) Общее сопротивление равно сумме сопротивлений всех резисторов

В) Общее сопротивление равно произведению сопротивлений всех резисторов

С) Общее сопротивление равно среднему арифметическому сопротивлений всех резисторов

Д) Обратное общее сопротивление равно сумме обратных сопротивлений всех резисторов

5. Что такое внутреннее сопротивление источника?

А) Сопротивление, которое оказывает источник току при его протекании через него

В) Сопротивление, которое оказывает внешняя цепь току при его протекании через нее

С) Сопротивление, которое оказывает амперметр току при его измерении

Д) Сопротивление, которое оказывает вольтметр току при его измерении

6. Какая формула выражает закон Джоуля-Ленца?

А) $Q = I^2 R t$

С) $Q = U^2 t / R$

В) $Q = U I t$

Д) Все вышеперечисленные

7. Что такое мощность электрического тока?

А) Работа, совершаемая током в единицу времени

В) Количество заряда, проходящего через поперечное сечение проводника в единицу времени

С) Сопротивление проводника

Д) Напряжение на концах проводника

8. Какая формула выражает мощность электрического тока?

А) $P = U I$

С) $P = U^2 / R$

В) $P = I^2 R$

Д) Все вышеперечисленные

9. Что такое короткое замыкание?

А) Ситуация, когда сопротивление цепи стремится к нулю

В) Ситуация, когда сопротивление цепи стремится к бесконечности

С) Ситуация, когда напряжение в цепи стремится к нулю

Д) Ситуация, когда напряжение в цепи стремится к бесконечности

10. Что такое перегрузка электрической цепи?

А) Ситуация, когда сила тока в цепи превышает допустимое значение

В) Ситуация, когда напряжение в цепи превышает допустимое значение

С) Ситуация, когда сопротивление цепи превышает допустимое значение

Д) Ситуация, когда мощность цепи превышает допустимое значение

Контрольные вопросы

1. Что такое электрический ток? Какова его единица измерения?

2. Что такое напряжение? Какова его единица измерения?

3. Что такое сопротивление? Какова его единица измерения?
4. Сформулируйте закон Ома для участка цепи.
5. Сформулируйте закон Ома для полной цепи.
6. Что такое ЭДС (электродвижущая сила) источника? Какова ее единица измерения?
7. Что такое внутреннее сопротивление источника? Какова его единица измерения?
8. Сформулируйте закон Джоуля-Ленца.
9. Что такое мощность электрического тока? Какова ее единица измерения?
10. Какая формула выражает мощность электрического тока?
11. Что такое короткое замыкание? Каковы его последствия?
12. Что такое перегрузка электрической цепи? Каковы ее последствия?
13. Как можно измерить силу тока в цепи? Какие приборы используются для этого?
14. Как можно измерить напряжение в цепи? Какие приборы используются для этого?
15. Как можно измерить сопротивление в цепи? Какие приборы используются для этого?
16. Как влияет температура на сопротивление проводника?

ПРИЛОЖЕНИЕ

Основные формулы раздела «Электрическое поле»

$q_1 + q_2 + \dots + q_n = const$ — закон сохранения заряда

Закон Кулона:

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2} \quad \text{— в вакууме}$$

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\varepsilon \cdot r^2} \quad \text{— в среде}$$

$$\vec{F} = \vec{E}q \quad \text{— электрическая сила}$$

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad \text{— напряженность}$$

Напряженность поля точечного заряда:

$$E = \frac{k \cdot q_0}{r^2} \quad \text{— в вакууме}$$

$$E = \frac{k \cdot q_0}{\varepsilon \cdot r^2} \quad \text{— в среде}$$

$$\varphi = \frac{W}{q} \quad \text{— потенциал}$$

$$A = qEd \cos \alpha \quad \text{— работа электростатического поля}$$

$$A = \Delta\varphi \cdot q = qU$$

$$\varphi = \frac{kq}{r} \quad \text{— потенциал поля точечного заряда}$$

$$\Delta\varphi = U = E \cdot d \quad \text{— связь между напряженностью и напряжением}$$

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E} \quad \text{— диэлектрическая проницаемость вещества}$$

$$C = \frac{q}{\varphi} \quad \text{— емкость}$$

$$C = \frac{q}{U} \quad \text{— емкость конденсатора}$$

Л. Бунина

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d} \quad - \text{емкость плоского конденсатора}$$

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots \quad - \text{последовательное соединение конденсаторов}$$

$$q = q_1 = q_2 = q_3 = \dots = q_n$$

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$$

$$C = C_1 + C_2 + \dots \quad - \text{параллельное соединение конденсаторов}$$

$$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n$$

$$q = q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n$$

$$W = \frac{q \cdot U}{2} = \frac{C \cdot U^2}{2} = \frac{q^2}{2C} \quad - \text{энергия электрического поля}$$

$$w = \frac{W_C}{V} = \frac{\varepsilon_0 E^2}{2} \quad - \text{плотность энергии электрического поля}$$

Основные формулы раздела «Законы постоянного тока»

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad - \text{сила тока}$$

$$R_{ш} = \frac{R_a \cdot I_a}{I_{ш} - I_a} = \frac{R_a}{n-1} \quad - \text{сопротивление шунта}$$

$$U = \frac{A}{q} \quad - \text{напряжение}$$

$$R_{д} = \frac{U - U_B}{U_B} R_B = (n-1)R_B \quad - \text{добавочное сопротивление}$$

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad - \text{сопротивление проводника}$$

$$I = \frac{U}{R} \quad - \text{закон Ома для участка цепи}$$

$$\varepsilon = \frac{A_{ст}}{\Delta q} \quad - \text{электродвижущая сила}$$

$$I = \frac{\varepsilon}{R+r} \quad - \text{закон Ома для полной цепи}$$

$$\left. \begin{aligned}
 I &= I_1 = I_2 = \dots \\
 U &= U_1 + U_2 + \dots \\
 R &= R_1 + R_2 + \dots \\
 R &= n \cdot R_i
 \end{aligned} \right\} \text{— последовательное соединение}$$

$$\left. \begin{aligned}
 U &= U_1 = U_2 = \dots \\
 I &= I_1 + I_2 + \dots \\
 \frac{1}{R} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots \\
 R &= \frac{R_1}{n}
 \end{aligned} \right\} \text{— параллельное соединение}$$

VI

$$A = I^2 R t = \frac{U^2 t}{R} \quad \text{— работа электрического тока на участке цепи}$$

$$A = \varepsilon I t = q \varepsilon = I^2 (R + r) t = \frac{\varepsilon^2 t}{R + r} \quad \text{— работа тока в замкнутой цепи}$$

$$Q = I^2 R t \quad \text{— закон Джоуля—Ленца}$$

$$P = \frac{A}{t} = IU = \frac{U^2}{R} = I^2 R = \frac{qU}{t} = \frac{\varepsilon^2 R}{(R + r)^2} \quad \text{— мощность электрического тока}$$

$$P = \varepsilon I = I^2 (R + r) = \frac{\varepsilon^2}{R + r} \quad \text{— полная мощность источника тока}$$

$$\eta = \frac{A_{\text{пол.}}}{A_{\text{загр.}}} \cdot 100\% = \frac{P_{\text{пол.}}}{P_{\text{загр.}}} = \frac{U}{\varepsilon} \cdot 100\% = \frac{\varepsilon^2}{R + r} \cdot 100\% \quad \text{— коэффициент полезного действия источника тока}$$

Елецкий Г

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Дмитриева, В.Ф. Физика для профессий и специальностей технического профиля : учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / В.Ф. Дмитриева. – 2-е изд., стер. – Москва : Издательский центр «Академия», 2017. – 448 с. — ISBN 978-5-4468-4138-7.

2. Мякишев, Г.Я. Физика. 10 класс : учеб. для общеобразоват. организаций с прил. на электрон. носителе : базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, Н.Н. Сотский ; под ред. Н.А. Парфентьевой. – Москва : Просвещение, 2016. – 416 с. : ил. – (Классический курс). – ISBN 978-5-09-028225-3.

3. Мякишев, Г.Я. Физика. 10 класс : учеб. для общеобразоват. организаций с прил. на электрон. носителе : базовый уровень [Электронный ресурс] / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, Н.Н. Сотский ; под ред. Н.А. Парфентьевой. – Режим доступа: URL: https://www.xn--24-6kct3an.xn--p1ai/%D0%A4%D0%B8%D0%B7%D0%B8%D0%BA%D0%B0_10_%D0%BA%D0%BB_%D0%9C%D1%8F%D0%BA%D0%B8%D1%88%D0%B5%D0%B2/index.html (дата обращения: 20.10.2025).

4. Электрическое поле и способы его описания [Электронный ресурс] // Formulki.ru. – Режим доступа: URL: <https://formulki.ru/electromagnetism/elektricheskoe-pole-i-sposoby-ego-opisaniya> (дата обращения: 20.10.2025).

5. Электрическое поле [Электронный ресурс] // Fizi4ka.ru. – Режим доступа: URL: <https://fizi4ka.ru/egje-2018-po-fizike/jelektricheskoe-pole.html> (дата обращения: 20.09.2025).

6. Принцип суперпозиции полей: формула [Электронный ресурс] // Obrazovaka.ru. – Режим доступа: URL: <https://obrazovaka.ru/fizika/princip-superpozicii-poley-formula.html> (дата обращения: 15.10.2025).

7. Мякишев, Г.Я. Физика. 10 класс [Электронный ресурс] : учебник / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, Н.Н. Сотский. – Режим доступа: URL: <https://www.utgt73.ru/uploads/biblioteka/fizika%2010.pdf> (дата обращения: 16.10.2025).

Учебное издание

Ирина Николаевна Зайцева
Светлана Сергеевна Токарева
Наталья Александровна Ярлыкова

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ (ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА)

Учебно-методическое
пособие

Печ.л. 3,8

Электронная версия

Размещено на сайте: <https://spo.elsu.ru/index.php?id=elektronnye-uchebnye-posobiya-prepodavatelej-instituta-spo>

Заказ 140

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина»
399770, г. Елец, ул. Коммунаров, 28,1