

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

Факультет доуниверситетской подготовки  
и профессиональной ориентации

**Г. Ф. Смирнова**

## ***ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ***

Методическое пособие по физике  
для абитуриентов

Минск БГУИР 2011

УДК 537.6/8(076)  
ББК 22.33я73  
С50

Р е ц е н з е н т:  
доцент кафедры физики  
учреждения образования «Белорусский государственный  
университет информатики и радиоэлектроники»,  
кандидат физико-математических наук  
Т. И. Стрелкова

**Смирнова, Г. Ф.**

С50      Электромагнетизм : метод. пособие по физике для абитуриентов /  
Г. Ф. Смирнова. – Минск : БГУИР, 2011. – 47 с. : ил.  
ISBN 978-985-488-725-8.

Рассмотрены основные понятия и законы электромагнетизма. Даны методические указания к решению задач. Предложены задачи для самостоятельного решения.

**УДК 537.6/8(076)**  
**ББК 22.33я73**

**ISBN 978-985-488-725-8**

© Смирнова Г. Ф., 2011  
© УО «Белорусский государственный  
университет информатики  
и радиоэлектроники», 2011

## ВВЕДЕНИЕ

Электромагнетизм – раздел физики, изучающий свойства электромагнитных полей.

Электрическое и магнитное поля – это составляющие одного и того же электромагнитного поля. Рассматривать их отдельно друг от друга можно только в случае стационарных полей.

Электромагнитное поле – это особый вид материи, осуществляющий взаимодействие тел между собой.

Электрическое поле создается зарядами или переменным магнитным полем.

Магнитное поле создается движущимися зарядами или переменным электрическим полем.

## 1. ЭЛЕКТРОСТАТИКА

Электростатика изучает поля, созданные неподвижными относительно данной системы отсчета зарядами.

### 1.1. Основные понятия и характеристики

*Электрический заряд  $q$*  – физическая величина, определяющая способность частиц участвовать в электромагнитном взаимодействии, неотъемлемое свойство элементарной частицы. Существует в двух видах: положительный и отрицательный. Заряд любого тела кратен элементарному.

*Элементарный заряд* равен  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

*Точечный заряд* – заряд, сосредоточенный в теле, которое в условиях данной задачи можно рассматривать как материальную точку.

*Объемная плотность заряда  $\rho$*  – заряд, приходящийся на единицу объема заряженного тела.

*Поверхностная плотность заряда  $\sigma$*  – заряд, приходящийся на единицу площади заряженного тела.

*Линейная плотность заряда  $\lambda$*  – заряд, приходящийся на единицу длины тела.

В случае равномерного распределения заряда по телу

$$\rho = \frac{q}{V}, \quad \sigma = \frac{q}{S}, \quad \lambda = \frac{q}{L}, \quad (1.1)$$

где  $q$  – заряд тела,  $V, S, L$  – объем, площадь, длина заряженного тела соответственно.

*Электрический диполь* – система из двух, равных по модулю, но противоположных по знаку зарядов, находящихся на расстоянии  $l$  друг от друга.

*Напряженность поля*  $\vec{E}$  – силовая характеристика поля, численно равная силе, действующей на единичный положительный точечный заряд, помещенный в данную точку поля:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}. \quad (1.2)$$

*Потенциал*  $\varphi$  – энергетическая характеристика, определяется как потенциальная энергия  $U(\vec{r})$  единичного положительного точечного заряда, помещенного в конкретную точку поля:

$$\varphi(\vec{r}) = \frac{U(\vec{r})}{q}. \quad (1.3)$$

*Силовая линия (линия напряженности) электростатического поля* – воображаемая линия, касательная к которой в любой точке совпадает с вектором напряженности в этой точке. Силовые линии проводятся так, чтобы их густота была пропорциональна (или равна) значению напряженности поля в данной точке пространства.

*Эквипотенциальная поверхность* – это поверхность равного потенциала, т. е. поверхность, во всех точках которой потенциал имеет одно и то же значение  $\varphi(\vec{r}) = \text{const}$ .

*Однородное поле* – поле, в каждой точке которого вектор напряженности постоянен по величине и направлению.

## 1.2. Свойства электростатических полей

*Напряженность поля*, созданного системой зарядов, определяется в каждой точке пространства согласно принципу суперпозиции как геометрическая сумма напряженностей полей, созданных отдельными зарядами.

Для дискретного распределения  $n$  зарядов

$$\vec{E}(\vec{r}) = \vec{E}_1(\vec{r}) + \vec{E}_2(\vec{r}) + \dots + \vec{E}_n(\vec{r}) = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i(\vec{r}). \quad (1.4)$$

*Потенциал поля*, созданного системой зарядов, определяется в каждой точке пространства согласно принципу суперпозиции, алгебраической суммой потенциалов полей, созданных каждым зарядом в отдельности. Для дискретного распределения  $n$  зарядов

$$\varphi(\vec{r}) = \varphi_1(\vec{r}) + \varphi_2(\vec{r}) + \dots + \varphi_n(\vec{r}) = \sum_{i=1}^n \varphi_i(\vec{r}). \quad (1.5)$$

*Поле может быть представлено графически с помощью силовых линий (линий напряженности) и эквипотенциальных поверхностей.*

Силловые линии и эквипотенциальные поверхности поля точечных зарядов представлены на рис. 1.1.

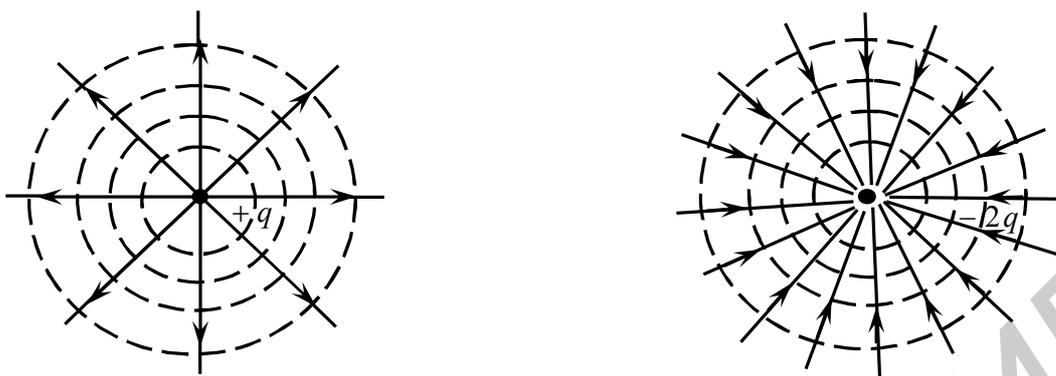


Рис. 1.1

Силловые линии и эквипотенциальные поверхности однородного (а) и неоднородного (б) полей представлены на рис. 1.2.

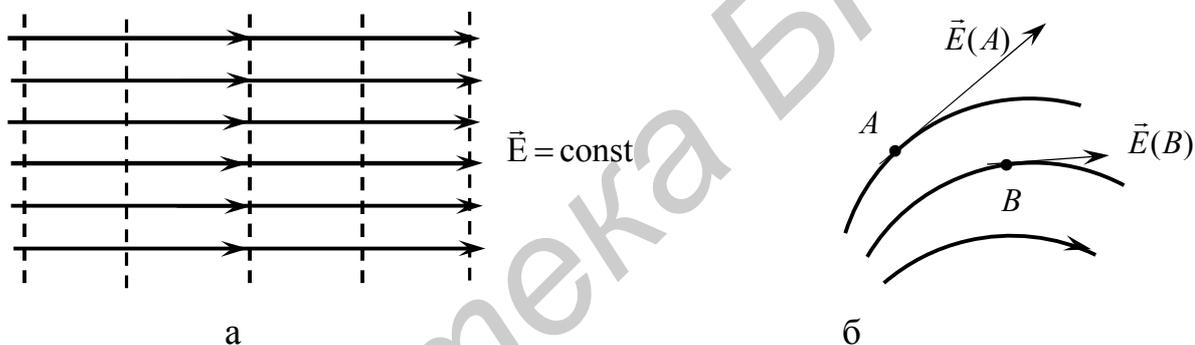


Рис. 1.2

Силловые линии и эквипотенциальные поверхности поля диполя представлены на рис. 1.3.

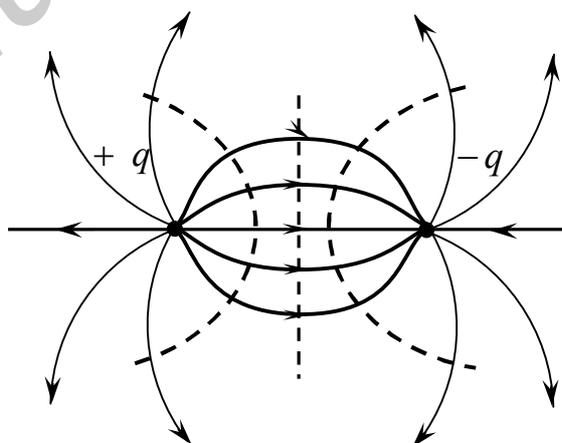


Рис. 1.3

### 1.3. Законы электростатики

**ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЗАРЯДА.** В любой электрически изолированной системе алгебраическая сумма зарядов есть величина постоянная:

$$q_1 + q_2 + \dots + q_n = \text{const} . \quad (1.6)$$

**ЗАКОН КУЛОНА.** Силы взаимодействия  $F$  двух точечных зарядов  $q_1$  и  $q_2$  прямо пропорциональны произведению этих зарядов, обратно пропорциональны квадрату расстояния  $r$  между ними и направлены вдоль прямой, соединяющей эти заряды (рис. 1.4):

$$F_{21} = F_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1||q_2|}{\epsilon r^2}, \quad (1.7)$$

Где  $F_{12}$  – сила, действующая на заряд  $q_1$  со стороны заряда  $q_2$ ;  $F_{21}$  – сила, действующая на заряд  $q_2$  со стороны заряда  $q_1$ ;  $k$  – коэффициент пропорциональности, равный в СИ  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ Нм}^2/\text{Кл}^2$ ;  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная;  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ ;  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды.

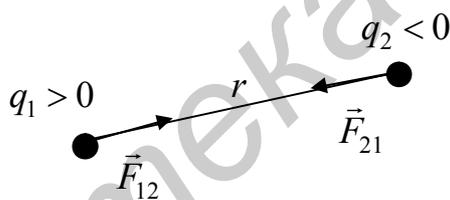


Рис. 1.4

### 1.4. Основные формулы

*Модуль напряженности  $E$  электрического поля, созданного точечным зарядом  $q$ :*

$$E = k \frac{|q|}{\epsilon r^2}. \quad (1.8)$$

*Потенциал  $\phi$  поля, созданного точечным зарядом  $q$ :*

$$\phi = k \frac{q}{\epsilon r}, \quad (1.9)$$

где  $r$  – расстояние от заряда  $q$  до точки пространства, в которой рассматривается поле.

*Напряженность поля равномерно заряженной проводящей сферы (рис. 1.5):*

$$E = 0 \text{ при } r < R, \quad E = k \frac{q}{\epsilon r^2} \text{ при } r \geq R, \quad (1.10)$$

где  $R$  – радиус сферы;  $q$  – заряд сферы.

Потенциал поля равномерно заряженной проводящей сферы (рис. 1.6):

$$\varphi = k \frac{q}{R} = \text{const} \text{ при } r \leq R, \quad \varphi = k \frac{q}{\epsilon r} \text{ при } r \geq R. \quad (1.11)$$

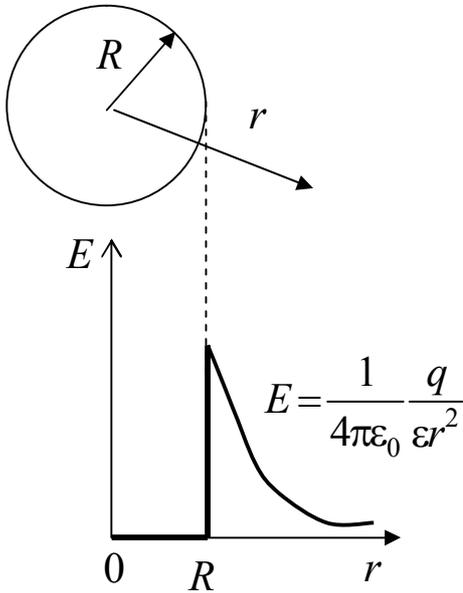


Рис. 1.5

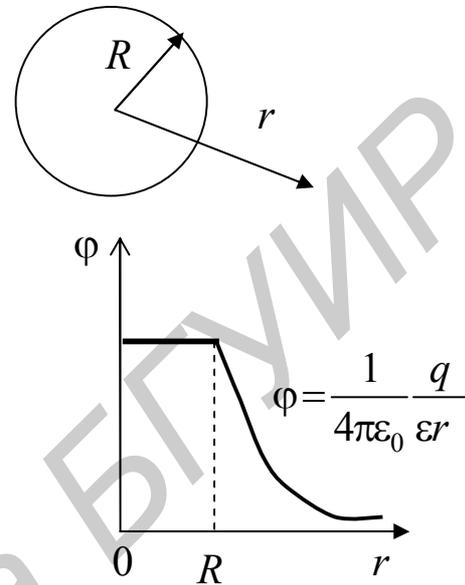


Рис. 1.6

Напряженность поля бесконечной равномерно заряженной плоскости (рис. 1.7):

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon\epsilon_0}. \quad (1.12)$$

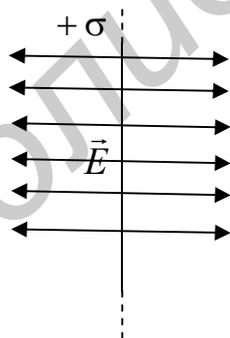


Рис. 1.7

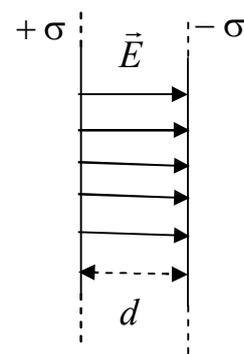


Рис. 1.8

Напряженность поля двух разноименно заряженных бесконечных плоскостей (рис. 1.8):

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0}, \quad (1.13)$$

где  $\sigma$  – поверхностная плотность заряда;  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды;  $\epsilon_0$  – электрическая константа.

Работа сил электростатического поля  $A$  определяется убылью потенциальной энергии  $U$  заряда  $q$ :

$$A_{12} = -\Delta U = U_1 - U_2 = q(\varphi_1 - \varphi_2), \quad (1.14)$$

где  $\varphi$  – потенциал поля в данной точке.

Для однородного поля

$$A_{12} = qEd, \quad (1.15)$$

где  $E$  – напряженность поля;  $d$  – расстояние между точками 1 и 2, отсчитанное вдоль силовой линии (рис. 1.9).

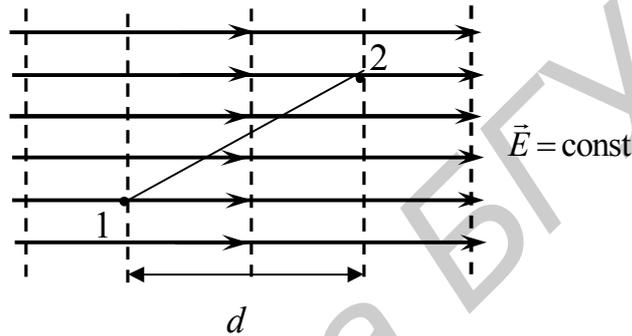


Рис. 1.9

Связь между напряженностью поля  $E$  и потенциалом  $\varphi$  для однородного поля:

$$Ed = \varphi_1 - \varphi_2. \quad (1.16)$$

Потенциальная энергия системы взаимодействующих зарядов:

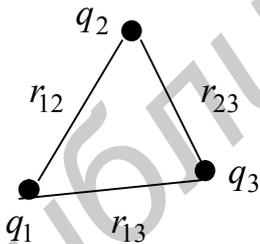


Рис. 1.10

$$W_{вз} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n q_i \varphi_i, \quad (1.17)$$

где  $q_i$  – заряд;  $\varphi_i$  – потенциал, созданный остальными зарядами в точке нахождения заряда  $q_i$ .

Для системы зарядов, изображенных на рис. 1.10:

$$W_{вз} = \frac{1}{2} (q_1 \varphi_1 + q_2 \varphi_2 + q_3 \varphi_3),$$

$$\text{где } \varphi_1 = k \frac{q_2}{r_{12}} + k \frac{q_3}{r_{13}}, \quad \varphi_2 = k \frac{q_1}{r_{12}} + k \frac{q_3}{r_{23}}, \quad \varphi_3 = k \frac{q_1}{r_{13}} + k \frac{q_2}{r_{23}}.$$

## 1.5. Электроемкость (емкость). Конденсаторы

Электроемкость – физическая величина, характеризующая способность проводника накапливать на себе электрические заряды.

Электроемкость (емкость) *уединенного проводника* – это коэффициент пропорциональности  $C$  между потенциалом проводника  $\varphi$  и зарядом  $q$ , находящемся на проводнике:

$$C = \frac{q}{\varphi}. \quad (1.18)$$

Емкость *уединенного шара* радиусом  $R$  равна

$$C = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R. \quad (1.19)$$

Конденсаторы – это устройства, обладающие способностью при малых размерах и небольших относительно окружающих тел потенциалах накапливать значительные по величине заряды.

Простейший конденсатор состоит из двух проводников (обкладок), разделенных между собой диэлектриком. Проводникам придают такую форму, чтобы поле было сосредоточено в узком зазоре между пластинами конденсатора. Такому условию отвечают: 1) две плоские параллельные пластины; 2) два коаксиальных цилиндра; 3) две концентрические сферы. В зависимости от *формы обкладок* конденсаторы делятся на плоские, сферические, цилиндрические.

Емкость конденсатора  $C$  – коэффициент пропорциональности между зарядом  $q$ , находящимся на одной из обкладок конденсатора, и разностью потенциалов  $\varphi_1 - \varphi_2$  (напряжению  $U$ ) между обкладками:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U}. \quad (1.20)$$

Емкость *плоского конденсатора*:

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}, \quad (1.21)$$

где  $S$  – площадь обкладки;  $d$  – расстояние между обкладками (см. рис. 1.8).

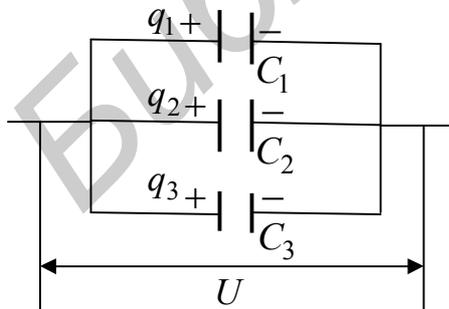


Рис. 1.11

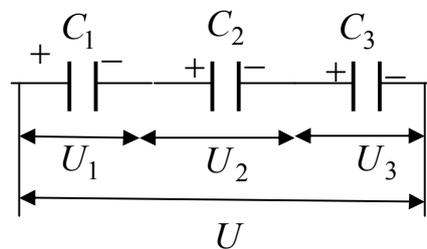


Рис. 1.12

При параллельном соединении конденсаторов в батарею (рис. 1.11) разность потенциалов на обкладках каждого из конденсаторов одинакова:

$$U_1 = U_2 = U_3 = \dots = U. \quad (1.22)$$

Заряд батареи конденсаторов равен сумме зарядов на обкладках конденсаторов, соединенных в батарею:

$$q = q_1 + q_2 + q_3 + \dots \quad (1.23)$$

Емкость батареи

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots \quad (1.24)$$

При параллельном соединении конденсаторов емкость батареи равна сумме емкостей отдельных конденсаторов батареи.

У последовательно соединенных конденсаторов (рис. 1.12) заряды всех обкладок равны по модулю:

$$|q_1| = |q_2| = |q_3| = \dots = |q|, \quad (1.25)$$

а разность потенциалов на зажимах батареи равна сумме падений напряжений на конденсаторах:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots \quad (1.26)$$

Емкость батареи последовательно соединенных конденсаторов рассчитывается по формуле

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots \quad (1.27)$$

Для двух конденсаторов

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}. \quad (1.28)$$

В случае соединения  $N$  конденсаторов одинаковой емкости  $C_1$  емкость батареи равна:

$C = NC_1$  при параллельном соединении и  $C = \frac{C_1}{N}$  при последовательном соединении.

*Энергия уединенного заряженного проводника*

$$W = \frac{q\varphi}{2} = \frac{C\varphi^2}{2} = \frac{q^2}{2C}, \quad (1.29)$$

где  $q$  – заряд проводника;  $\varphi$  – потенциал;  $C$  – емкость проводника.

*Энергия конденсатора*

$$W = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2}, \quad (1.30)$$

где  $q$  – заряд обкладки конденсатора;  $U$  – напряжение между обкладками;  $C$  – емкость конденсатора.

### Энергия однородного электрического поля

$$W = \frac{\epsilon\epsilon_0 E^2}{2} V, \quad (1.31)$$

где  $E$  – модуль напряженности электрического поля;  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды;  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная;  $V$  – объем, в котором сосредоточена энергия.

## 1.6. Методические указания

### А. Взаимодействие зарядов:

- расставить силы, действующие на заряд, помещенный в электрическое поле;
- записать для рассматриваемого заряда уравнение равновесия или основное уравнение динамики (2-й закон Ньютона);
- выразить силы электростатического взаимодействия через заряды и поля;
- подставить эти выражения в исходные уравнения;
- в случае перераспределения зарядов между взаимодействующими заряженными телами воспользоваться законом сохранения зарядов;
- в случае необходимости записать вспомогательные формулы и решить полученную систему уравнений относительно неизвестной величины.

### В. Расчет полей:

- при расчете в какой-либо точке пространства напряженности или потенциала поля, созданного системой зарядов, заряженными сферами или плоскостями, необходимо использовать принцип суперпозиции полей и соответствующие формулы для расчета потенциалов и модулей напряженностей.

### С. Конденсаторы:

- установить тип соединения конденсаторов (последовательное или параллельное);
- определить связь между зарядами и напряжениями на конденсаторах;
- найти общую емкость батареи конденсаторов;
- из полученной системы уравнений найти неизвестную величину.

При решении задач на конденсаторы следует помнить:

если конденсатор подключить к источнику напряжения, зарядить его, а затем отключить, то заряд, накопленный на обкладках конденсатора, сохраняется при изменении емкости конденсатора (раздвижение пластин, заполнение пространства между пластинами конденсатора диэлектриком и т. п.);

если конденсатор остается подключенным к источнику напряжения, то при всех указанных выше изменениях емкости конденсатора напряжение между пластинами конденсатора остается неизменным.

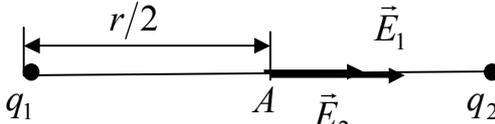
## 1.7. Примеры решения задач

Задача 1.1. Одинаковые металлические шарики с зарядами  $q_1=1$  мкКл,  $q_2=4$  мкКл находятся на расстоянии  $r_1=1$  м друг от друга. Шарики привели в соприкосновение. На какое расстояние  $r_2$  следует развести шарики, чтобы сила их кулоновского взаимодействия осталась прежней?

<p>Дано:  <math>q_1=1</math> мкКл  <math>q_2=4</math> мкКл  <math>r_1=1</math> м</p>	<p>Решение          Так как шарики одинаковые, то после их соприкосновения заряд между ними распределится поровну:</p> $q = q_1' = q_2' = \frac{q_1 + q_2}{2}.$
<p>Найти <math>r_2</math></p>	<p>Сила кулоновского взаимодействия шариков до соприкосновения равна</p> $F_1 = k \frac{ q_1  q_2 }{r_1^2}.$ <p>После соприкосновения</p> $F_1 = k \frac{q^2}{r_2^2}.$ <p>По условию задачи <math>F_1 = F_2</math>.</p> <p>Приравняем силы и найдем искомую величину <math>r_2</math>.</p> $k \frac{ q_1  q_2 }{r_1^2} = k \frac{(q_1 + q_2)^2}{4r_2^2},$ $r_2 = r_1 \frac{(q_1 + q_2)}{2\sqrt{q_1q_2}} = 1,25 \text{ (м)}.$ <p>Ответ: 1,25 м.</p>

Задача 1.2. Расстояние между двумя зарядами  $q_1=3$  мкКл и  $q_2=-1,5$  мкКл, находящимися в вакууме, равно  $r=0,2$  км. Определить модуль напряженности поля  $E$  в середине отрезка, соединяющего заряды.

<p>Дано:  <math>q_1=3</math> мкКл  <math>q_2=-1,5</math> мкКл  <math>r=0,2</math> км</p>	<p>Решение          В соответствии с принципом суперпозиции <math>\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2</math>, где <math>\vec{E}</math> – напряженность результирующего поля; <math>\vec{E}_1</math> – напряженность поля, созданного зарядом <math>q_1</math>; <math>\vec{E}_2</math> – напряженность поля, созданного зарядом <math>q_2</math>.</p>
<p>Найти <math>E</math></p>	

	 <p>Векторы <math>\vec{E}_1</math> и <math>\vec{E}_2</math> сонаправлены, поэтому модуль результирующего поля</p> $E = E_1 + E_2 = k \frac{ q_1 }{(r/2)^2} + k \frac{ q_2 }{(r/2)^2} = k \frac{ q_1  +  q_2 }{(r/2)^2} =$ $= 4,05(\text{В/м}).$ <p>Ответ: 4,05 В/м.</p>
--	---

Задача 1.3. Заряды  $q_1=10$  мкКл,  $q_2=30$  мкКл и  $q_3=-20$  мкКл расположены в вершинах правильного треугольника со стороной  $a=10$  см. Определить потенциальную энергию  $W$  этой системы зарядов.

<p>Дано:</p> $q_1=10$ мкКл $q_2=30$ мкКл $q_3=-20$ мкКл $a=10$ см	<p>Решение</p> <p>Потенциальная энергия системы взаимодействующих зарядов</p> $W = \frac{1}{2}(q_1\varphi_1 + q_2\varphi_2 + q_3\varphi_3),$ <p>где <math>\varphi_1</math> – потенциал поля в месте нахождения заряда <math>q_1</math>; <math>\varphi_2</math> – потенциал поля в месте нахождения заряда <math>q_2</math>; <math>\varphi_3</math> – потенциал поля в месте нахождения заряда <math>q_3</math>.</p>
<p>Найти <math>W</math></p>	$\varphi_1 = r\left(\frac{q_2}{a} + \frac{q_3}{a}\right), \varphi_2 = r\left(\frac{q_1}{a} + \frac{q_3}{a}\right), \varphi_3 = r\left(\frac{q_1}{a} + \frac{q_2}{a}\right).$ <p>Таким образом,</p> $W = \frac{1}{2}k \left[ \frac{q_1(q_2 + q_3)}{a} + \frac{q_2(q_1 + q_3)}{a} + \frac{q_3(q_1 + q_2)}{a} \right] =$ $= 45(\text{Дж}).$ <p>Ответ: <math>W=45</math> Дж.</p>

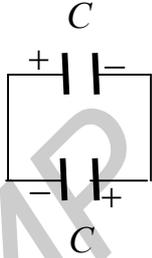
Задача 1.4. При перемещении точечного заряда  $q_1$  на расстояние  $d_1=5$  см вдоль силовых линий однородным электрическим полем совершена работа  $A_1=15$  Дж. Какую работу  $A_2$  совершит поле при перемещении вдвое большего заряда  $q_2$  на расстояние  $d_2=3$  см вдоль силовых линий?

<p>Дано:  <math>d_1 = 5</math> см  <math>A_1 = 15</math> Дж  <math>d_2 = 3</math> см  <math>q_2 = 2q_1</math></p>	<p>Решение          Работа по перемещению заряда <math>q_1</math> :  <math>A_1 = q_1 E d_1</math> .          Работа по перемещению заряда <math>q_2</math> :  <math>A_2 = q_2 E d_2 = 2q_1 E d_2</math> .          Возьмем отношение <math>A_2 / A_1</math> :</p>
<p>Найти <math>A_2</math></p>	$\frac{A_2}{A_1} = \frac{2q_1 E d_2}{q_1 E d_1} = \frac{2d_2}{d_1}$ <p>Находим</p> $A_2 = A_1 \frac{2d_2}{d_1} = 18 \text{ (Дж)}$ <p>Ответ: <math>A_2 = 18</math> Дж.</p>

Задача 1.5. Плоский воздушный конденсатор подключают в сеть с постоянным напряжением  $U_1 = 300$  В. Затем его отключают от сети и пространство между пластинами полностью заполняют диэлектриком. Относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика  $\epsilon$  равна 6. Каким станет напряжение  $U_2$  на обкладках конденсатора?

<p>Дано:  <math>U_1 = 300</math> В  <math>\epsilon = 6</math></p>	<p>Решение          Первоначальная емкость конденсатора  <math display="block">C_1 = \frac{q}{U_1}, \quad C_1 = \frac{\epsilon_0 S}{d}</math></p>
<p>Найти <math>U_2</math></p>	<p>Так как конденсатор после зарядки отсоединяют от сети, то заряд, накопленный на обкладках, сохраняется. После заполнения пространства между пластинами конденсатора диэлектриком его емкость изменяется:</p> $C_2 = \frac{q}{U_2}; \quad C_2 = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d} = \epsilon C_1$ <p>Следовательно,</p> $\frac{q}{U_2} = \epsilon \frac{q}{U_1}$ <p>Находим <math>U_2 = \frac{U_1}{\epsilon} = 50</math> (В).</p> <p>Ответ: <math>U_2 = 50</math> В.</p>

Задача 1.6. Два одинаковых плоских конденсатора емкостью  $C=100$  мкФ каждый заряжены до разности потенциалов  $U_1=100$  В и  $U_2=300$  В соответственно. Какая энергия  $W$  выделится при перераспределении заряда, если разноименные пластины конденсатора соединить проводником?

<p>Дано:  <math>C=100</math> мкФ  <math>U_1=100</math> В  <math>U_2=300</math> В</p>	<p>Решение</p> <p>Находим заряды, накопленные на пластинах конденсаторов до их соединения:</p> $q_1 = CU_1, q_2 = CU_2.$
<p>Найти <math>W</math></p>	<p>Энергия, запасенная в этих конденсаторах:</p> $W_1 = \frac{CU_1^2}{2} + \frac{CU_2^2}{2}.$ <p>После соединения разноименных пластин суммарный заряд на обкладках конденсаторов станет равным</p> $q =  q_1 - q_2  =  CU_1 - CU_2 ,$ <p>а суммарная емкость – <math>2C</math>.</p> <p>Энергия батареи конденсаторов</p> $W_2 = \frac{(CU_1 - CU_2)^2}{2 \cdot 2C}.$ <p>Выделяемая энергия <math>W</math> равна</p> $W = W_1 - W_2 = \frac{CU_1^2}{2} - \frac{CU_2^2}{2} - \frac{C(U_1 - U_2)^2}{4} = 4 \text{ (Дж)}.$ <p>Ответ: <math>W=4</math> Дж.</p> 

### 1.8. Задачи для самостоятельного решения

1. Нейтральная водяная капля разделилась на две. Первая из них обладает зарядом  $-1,5$  нКл. Определить в нанокуллонах заряд второй капли.
2. Две небольшие частицы с одинаковыми зарядами на расстоянии  $18$  км в вакууме отталкиваются с силой, равной  $0,001$  Н. Определить в милликуллонах модуль заряда частицы.
3. Какой положительный заряд в микрокулонах нужно сообщить системе из двух маленьких шариков, чтобы сила кулоновского отталкивания оказалась равной  $90$  Н? Расстояние между шариками равно  $1$  м. Заряд распределен поровну между шариками.
4. Во сколько раз уменьшится сила взаимодействия двух одинаковых точечных зарядов, если модуль каждого заряда уменьшить в  $2$  раза и перенести их из вакуума в среду с диэлектрической проницаемостью, равной  $2,5$ ? Расстояние между зарядами не меняется.

5. На шелковой нити подвешен маленький шарик массой 300 мг и зарядом 30 нКл. На какое расстояние следует поместить снизу второй такой же заряд, чтобы сила натяжения нити уменьшилась в 4 раза?
6. Одинаковые металлические шарики с зарядами 1 и 4 мкКл находятся на расстоянии 1 м друг от друга. Шарики привели в соприкосновение. На какое расстояние следует развести шарики, чтобы сила их кулоновского взаимодействия осталась прежней?
7. Во сколько раз уменьшится сила взаимодействия между маленькими одинаковыми шариками с зарядами 1 и 3 мкКл, если их после соприкосновения развести на расстояние вдвое большее, чем первоначальное?
8. На точечный заряд, помещенный в поле другого точечного заряда, действует сила 60 Н. Определить модуль силы, действующей на этот заряд на вдвое большем расстоянии от источника поля.
9. Во сколько раз уменьшится сила кулоновского притяжения двух маленьких шариков с одинаковыми по модулю зарядами, если, не изменяя расстояния между ними, перенести половину заряда с первого шарика на второй?
10. Маленький шарик массой 0,016 мг, с поверхности которого сорвано 100 электронов, падает на землю. Определить модуль начального ускорения шарика, если на расстоянии 3 см снизу от него поместить точечный заряд 20 мкКл. Спротивлением пренебречь.
11. Во сколько раз увеличился модуль напряженности в некоторой точке электрического поля точечного заряда при увеличении заряда в 3 раза?
12. Два одинаковых точечных заряда по 2 мкКл каждый находятся в точках (0,0) и (2,0) прямоугольной системы координат (X,Y), где X,Y заданы в метрах. Определить проекцию на ось X вектора напряженности электрического поля в точке (1,1).
13. Маленький заряженный шарик массой 10 г и зарядом 10 мкКл подвешен на нити в однородном электрическом поле напряженностью 1000 В/м, созданном вблизи поверхности Земли. Силовые линии поля направлены вертикально вниз. Определить модуль силы натяжения нити.
14. В пяти вершинах правильного шестиугольника со стороной 1 м находятся положительные точечные заряды по 0,1 мкКл. Определить модуль напряженности электрического поля в центре шестиугольника.
15. На двух проводящих концентрических сферах радиусами 20 и 40 см находятся заряды  $-0,2$  и  $0,3$  мкКл. Определить модуль напряженности электрического поля на расстоянии 60 см от поверхности внешней сферы.
16. Определить максимальное значение модуля напряженности электрического поля точечного заряда в точке, лежащей посередине между точками поля со значениями напряженности 36 В/м и 9 В/м соответственно.

17. Расстояние между зарядами  $3$  и  $-1,5$  мкКл, находящимися в вакууме, равно  $0,2$  км. Определить модуль напряженности поля в середине отрезка, соединяющего заряды.
18. С каким максимальным по модулю ускорением может двигаться тело массой  $10$  г и зарядом  $1$  мкКл вблизи поверхности Земли под действием сил тяготения и силы со стороны однородного электрического поля с напряженностью  $10$  кВ/м?
19. Гладкий шарик с зарядом  $5$  мкКл, лежащий на горизонтальной подставке, прикреплен с помощью пружины жесткостью  $1$  Н/м к стене. Определить значение абсолютной деформации пружины, если вдоль оси пружины создано однородное электрическое поле напряженностью  $10$  кВ/м.
20. Три одинаковые тонкие металлические пластинки, расположенные параллельно с небольшими зазорами, несут заряды  $1$ ,  $2$  и  $3$  мкКл. Какова напряженность поля между второй и третьей пластинкой?
21. На расстоянии  $30$  м от уединенного точечного заряда потенциал электрического поля равен  $3000$  В. Определить по этим данным модуль заряда в микрокулонах.
22. Рассмотрим две точки поля положительного точечного заряда. В первой точке модуль напряженности электрического поля в  $4$  раза больше, чем во второй. Во сколько раз потенциал поля в первой точке больше, чем во второй?
23. По поверхности металлического шара радиусом  $2$  м равномерно распределен заряд  $0,1$  мкКл. Определить потенциал электрического поля в центре шара.
24. Во сколько раз уменьшится значение потенциала поля точечного заряда при увеличении расстояния до заряда в  $4$  раза?
25. При переносе точечного заряда из вакуума в среду потенциал электрического поля на расстоянии  $3$  м от заряда меняется от  $500$  до  $200$  В. Определить относительную диэлектрическую проницаемость среды.
26. На расстоянии  $1$  м от центра заряженного металлического шара радиусом  $3$  м потенциал электрического поля равен  $3$  В. Определить потенциал электрического поля на расстоянии  $2$  м от центра шара.
27. На расстоянии  $6$  м от уединенного точечного заряда потенциал электрического поля равен  $900$  В. Определить модуль вектора напряженности в этой точке поля.
28. По тонкому кольцу радиусом  $1$  м равномерно распределен заряд  $0,1$  мкКл. Определить потенциал электрического поля в центре кольца.
29. Удаленные друг от друга изолированные проводники с одинаковыми зарядами имеют потенциалы  $20$  В и  $30$  В. Каким станет потенциал этих проводников, если их соединить тонкой проволокой?

30. Заряды 10, 30 и  $-20$  мкКл расположены в вершинах правильного треугольника со стороной 10 см. Определить потенциальную энергию этой системы зарядов.
31. Какую максимальную работу может совершить сила, действующая со стороны однородного электрического поля с напряженностью 15 кВ/м, при его перемещении на 2 см.
32. Первоначально электрический заряд 3 мкКл находится в точке, потенциал которой равен 8 В. Определить потенциал точки поля, при переносе в которую этого заряда электрическое поле совершило работу, равную  $-6$  мкДж.
33. Точечный заряд 10 мкКл закреплен в начале координат плоскости (X,Y). Определить работу поля по переносу точечного заряда 1 мкКл из точки с координатами (2м,0) в точку с координатами (0,2м).
34. При перемещении электрического заряда между точками с разностью потенциалов 8 В сила, действующая на заряд со стороны электрического поля, совершила работу 4 Дж. Определить модуль переносимого заряда.
35. При перемещении точечного заряда на 5 см вдоль силовых линий однородным электрическим полем совершена работа 15 Дж. Какую работу совершит поле при перемещении вдвое большего заряда на 3 см вдоль силовых линий?
36. Какую разность потенциалов должен пройти первоначально покоящийся электрон, чтобы приобрести кинетическую энергию 150 эВ?
37. Какую работу в микроджоулях совершает однородное электрическое поле с напряженностью 100 В/м при перемещении заряда 2 мкКл на 2 см в направлении, составляющем угол  $60^\circ$  с направлением силовых линий?
38. Какую работу в микроджоулях совершает однородное электрическое поле напряженностью 500 В/м при перемещении заряда 5 мкКл на 4 см в направлении, противоположном направлению силовых линий?
39. Четыре положительных точечных заряда по 1 мкКл каждый находятся в вакууме на достаточно большом расстоянии друг от друга. Какую минимальную работу в миллиджоулях необходимо совершить, чтобы расположить эти заряды в вершинах квадрата со стороной 9 см?
40. Электрон, имея скорость  $1,6 \cdot 10^6$  м/с, влетает в однородное электрическое поле с напряженностью 90 В/м и летит в нем по силовой линии до полной остановки. Сколько для этого потребуется времени? Ответ привести в микросекундах. Массу электрона принять равной  $9 \cdot 10^{-31}$  кг.
41. Частица массой  $10^{-9}$  кг и зарядом 1 мкКл влетает в однородное электрическое поле с напряженностью 1000 В/м перпендикулярно силовым линиям. Определить работу сил поля за первую секунду движения.
42. Определить в миллифарадах емкость конденсатора, если заряд конденсатора равен 0,03 Кл, а разность потенциалов между обкладками составляет 20 В.

43. В конденсаторе переменной емкости площадь пластин может меняться от  $1,5$  до  $4,5 \text{ см}^2$  при неизменном расстоянии между пластинами. Во сколько раз наибольшее значение емкости конденсатора больше наименьшего?
44. Во сколько раз возрастет емкость плоского конденсатора, если объем пространства между обкладками увеличить в 2 раза при одновременном уменьшении расстояния между обкладками в 1,5 раза?
45. Плоский воздушный конденсатор подключают в сеть с постоянным напряжением 300 В. Затем его отключают от сети и пространство между пластинами полностью заполняют диэлектриком. Относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика равна 6. Каким станет напряжение на обкладках конденсатора?
46. В поле между обкладками плоского конденсатора на заряд  $0,2 \text{ мкКл}$  действует сила  $50 \text{ мкН}$ . До какого напряжения заряжен конденсатор, если расстояние между пластинами  $0,03 \text{ м}$ ? Перераспределением заряда на пластинах пренебречь.
47. Два плоских конденсатора емкостью  $2 \text{ мкФ}$ , соединенных последовательно, подключили к источнику напряжения  $360 \text{ В}$  и затем отключили. Определить напряжение на конденсаторах, если их соединить параллельно одноименными пластинами.
48. Конденсаторы емкостью  $4,5$  и  $1,5 \text{ мкФ}$  соединили последовательно и подключили к источнику напряжением  $120 \text{ В}$ . Определить разность потенциалов между обкладками конденсатора емкостью  $1,5 \text{ мкФ}$ .
49. Плоский конденсатор зарядили так, что напряженность поля в конденсаторе равна  $315 \text{ В/м}$  и, не отключая от источника тока, увеличили расстояние между пластинами в 3 раза. Определить модуль напряженности поля в конденсаторе после раздвижения пластин.
50. Определить в микрофарадах емкость конденсатора, если его энергия при заряде на обкладках  $0,008 \text{ Кл}$  равна  $2 \text{ Дж}$ .
51. Модуль напряженности электрического поля между пластинами плоского конденсатора возрастает в 2 раза. Во сколько раз увеличивается энергия, запасенная в конденсаторе?
52. Два одинаковых плоских конденсатора емкостью  $100 \text{ мкФ}$  каждый заряжены до разности потенциалов  $100$  и  $300 \text{ В}$  соответственно. Какая энергия выделится при перераспределении заряда, если разноименные пластины конденсатора соединить проводником?
53. Частица с зарядом  $0,1 \text{ мкКл}$  влетает в плоский конденсатор емкостью  $2 \text{ мкФ}$  вблизи первой пластины и отклоняется ко второй. Определить изменение кинетической энергии частицы за время движения от одной пластины к другой. Заряд конденсатора равен  $1,4 \text{ Кл}$ .
54. Электрон с кинетической энергией  $120 \text{ эВ}$  влетает в плоский конденсатор под углом  $30^\circ$  к пластинам. Определить модуль разности потенциалов электрического поля между точками влета и вылета электрона

из конденсатора, если электрон вылетает из конденсатора под углом  $45^\circ$  к пластинам.

55. Два удаленных друг от друга одинаковых шара емкостью по  $4,7 \text{ мкФ}$  заряжены до потенциалов  $1000$  и  $-1000 \text{ В}$ . Вычислить энергию, выделяющуюся в проводнике при соединении шаров.
56. Плоский конденсатор с расстоянием между пластинами  $4 \text{ мм}$  погружается в керосин с диэлектрической проницаемостью равной  $2$ . Каким нужно сделать расстояние между пластинами, чтобы емкость осталась неизменной? Ответ привести в миллиметрах.
57. Пылинка массой  $0,8 \text{ г}$  висит между пластинами воздушного конденсатора, к которому приложено напряжение  $5 \text{ кВ}$ . Расстояние между пластинами  $1 \text{ см}$ . Каков заряд пылинки? Ответ запишите в нанокулонах.
58. Потенциалы металлических шаров емкостью  $6 \text{ мкФ}$  и  $9 \text{ мкФ}$  равны  $200$  и  $800 \text{ В}$  соответственно. Их соединяют тонкой длинной проволокой. Какой заряд окажется на меньшем шаре? Ответ привести в милликулонах.
59. Одна из пластин плоского конденсатора имеет потенциал  $6 \text{ В}$ , а другая пластина заземлена. Определить модуль напряженности электрического поля в конденсаторе, если расстояние между пластинами равно  $1 \text{ см}$ .
60. Электрон с кинетической энергией  $100 \text{ эВ}$  влетает в плоский конденсатор под углом  $30^\circ$  к пластинам. Определить в электронвольтах работу сил электрического поля за время движения электрона в конденсаторе, если электрон вылетает из конденсатора под углом  $45^\circ$  к пластинам.

## 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

### 2.1. Основные понятия и характеристики

*Электрическим током* называют упорядоченное (направленное) движение заряженных частиц.

За направление тока принимают то направление, в котором упорядоченно движутся положительно заряженные частицы.

Электрический ток характеризуют силой тока  $I$  и плотностью тока  $\vec{j}$ .

*Сила тока* равна заряду, переносимому через сечение проводника в единицу времени.

Для постоянного тока

$$I = \frac{q}{t}. \quad (2.1)$$

Плотность тока определяется зарядом, переносимым в единицу времени через единичную площадь сечения, перпендикулярного к направлению упорядоченного движения носителей тока.

Для постоянного тока модуль плотности тока равен

$$j = \frac{q}{S_{\perp} \cdot t} = \frac{I}{S_{\perp}}. \quad (2.2)$$

Направление вектора  $\vec{j}$  определяется направлением скорости  $\vec{u}^+$  движения положительных носителей:

$$\vec{j} = n^+ e^+ \vec{u}^+. \quad (2.3)$$

Для отрицательных носителей

$$\vec{j} = n^- e^- \vec{u}^-. \quad (2.4)$$

В общем случае при наличии носителей тока обоих знаков

$$\vec{j} = n^+ e^+ \vec{u}^+ + n^- e^- \vec{u}^-, \quad (2.5)$$

где  $n^+, n^-$  – концентрации положительных и отрицательных носителей;  $e^+, e^-$  – заряды положительных и отрицательных носителей;  $u^+, u^-$  – скорости направленного движения носителей.

Электродвижущая сила (ЭДС)  $\mathcal{E}$  определяется работой  $A^*$ , которую совершают сторонние силы над единичным положительным зарядом при перемещении заряда в замкнутой цепи или на ее участке:

$$\mathcal{E} = \frac{A^*}{q}. \quad (2.6)$$

(Сторонние силы – это силы неэлектростатического происхождения, действующие внутри источника тока, т. е. имеющие химическую природу, или магнитные силы).

Разность потенциалов  $\varphi_1 - \varphi_2$  определяется работой  $A$ , которую совершают силы электростатического поля над единичным положительным зарядом на участке цепи 1 – 2:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q}. \quad (2.7)$$

Падение напряжения, или напряжение  $U_{12}$ , на данном участке определяется работой, совершаемой электростатическими и сторонними силами над единичным положительным зарядом:

$$U_{12} = \frac{A + A^*}{q} = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}. \quad (2.8)$$

Для однородного участка цепи, на котором не действуют сторонние силы,

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2. \quad (2.9)$$

## 2.2. Основные законы и формулы

ЗАКОН ОМА ДЛЯ ОДНОРОДНОГО УЧАСТКА ЦЕПИ (рис. 2.1)

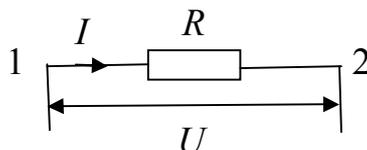


Рис. 2.1

Сила тока  $I$ , текущего по однородному участку цепи, пропорциональна падению напряжения  $U$  на этом участке:

$$I = \frac{U}{R}, \quad (2.10)$$

где  $R$  – сопротивление проводника.

Сопротивление однородного цилиндрического проводника длиной  $l$  и площадью поперечного сечения  $S$  равно

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (2.11)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление вещества.

Сопротивление проводника зависит от температуры:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t), \quad (2.12)$$

где  $R_t, R_0$  – сопротивления проводника при температуре  $t$  и  $0^\circ\text{C}$  соответственно;  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления.

*Соединение проводников*

1. Последовательное соединение (рис. 2.2).

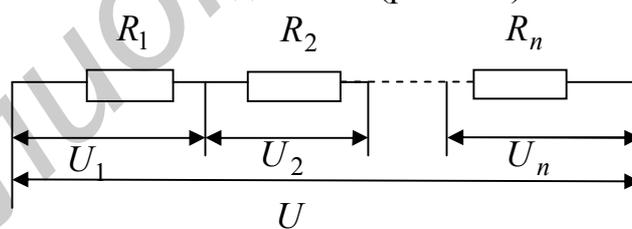


Рис. 2.2

При последовательном соединении через все проводники протекает один и тот же ток:

$$I_1 = I_2 = \dots = I_n = I. \quad (2.13)$$

Падение напряжения  $U$  равно сумме падений напряжений:

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n. \quad (2.14)$$

Общее сопротивление равно сумме сопротивлений:

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n. \quad (2.15)$$

2. Параллельное соединение (рис. 2.3).

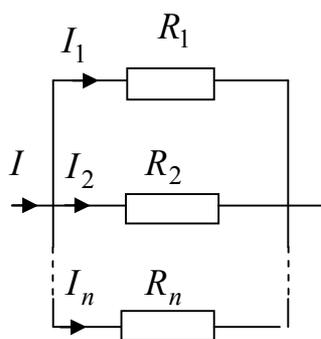


Рис. 2.3

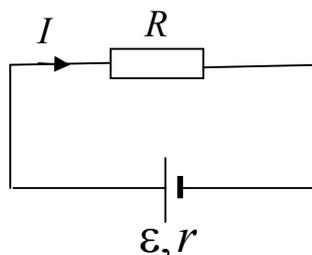


Рис. 2.4

При параллельном соединении падение напряжения  $U$  на всех сопротивлениях одно и то же:

$$U_1 = U_2 = \dots = U_n. \quad (2.16)$$

Полный ток  $I$  равен сумме токов, текущих через параллельно соединенные сопротивления:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n. \quad (2.17)$$

Общее сопротивление цепи определяется по формуле

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}. \quad (2.18)$$

Для двух сопротивлений

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}. \quad (2.19)$$

**ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПОЛНОЙ (ЗАМКНУТОЙ) ЦЕПИ**

Сила тока в замкнутой цепи равна отношению ЭДС цепи к ее полному сопротивлению:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}. \quad (2.20)$$

Если  $R = 0$ , то происходит короткое замыкание цепи. Ток короткого замыкания равен

$$I_{\text{к.з.}} = \frac{\varepsilon}{r}. \quad (2.21)$$

**СОЕДИНЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ ТОКА В БАТАРЕИ**

Соединение  $N$  одинаковых источников тока с ЭДС  $\varepsilon_1$  и внутренним сопротивлением  $r_1$  в батарее:

а) последовательное соединение (рис. 2.5 ).

$$r_{\text{бат}} = N r_1, \quad \varepsilon_{\text{бат}} = N \varepsilon_1;$$

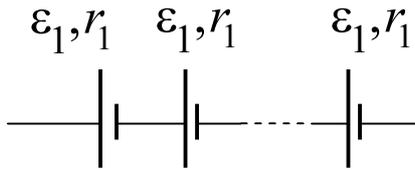


Рис. 2.5

б) параллельное соединение (рис. 2.6).

$$\mathcal{E}_{\text{бат}} = \mathcal{E}_1, \quad r_{\text{бат}} = \frac{r_1}{N}.$$

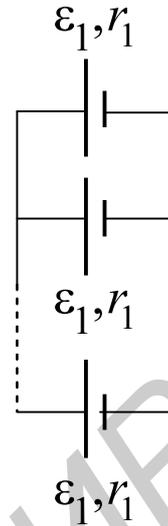


Рис. 2.6

Мощность тока  $P$ . Коэффициент полезного действия  $\eta$

*Полная мощность источника тока*

$$P = I\mathcal{E} = I^2(R + r) = IU + I^2r = \frac{\mathcal{E}^2}{R + r}, \quad (2.22)$$

где  $\mathcal{E}$  – ЭДС источника тока;  $I$  – полный ток;  $R$  – сопротивление внешней цепи;  $r$  – внутреннее сопротивление источника тока;  $U$  – падение напряжения во внешней цепи.

*Полезная мощность  $P'$  (мощность, выделяющаяся на нагрузке)*

$$P' = IU = I^2R = \frac{\mathcal{E}^2 R}{(R + r)^2}. \quad (2.23)$$

Полезная мощность достигает максимального значения при условии

$$R = r. \text{ При этом } I = \frac{\mathcal{E}}{2r}, \quad P'_{\text{max}} = \frac{\mathcal{E}^2}{4r}.$$

*Мощность потерь  $P''$  (сопротивление подводящих проводов пренебрежимо мало)*

$$P'' = I^2r. \quad (2.24)$$

Если подводящие провода обладают сопротивлением  $R_{\text{пр}}$ , то мощность потерь на проводах

$$P''' = I^2R_{\text{пр}}. \quad (2.25)$$

*Коэффициент полезного действия*

$$\eta = \frac{P'}{P} 100 \% = \frac{U}{\mathcal{E}} 100 \% = \frac{R}{R + r} 100 \%. \quad (2.26)$$

**ЗАКОН ДЖОУЛЯ–ЛЕНЦА.** Количество теплоты, выделяемое проводником с током, равно произведению квадрата силы тока, сопротивления проводника и времени прохождения тока по проводнику:

$$Q = I^2 R t = I U t. \quad (2.27)$$

### 2.3. Проводники второго рода (электролиты)

*Электролиты* – растворы, проводящие ток.

*Электролиз* – явление выделения составных частей растворенных в жидкости веществ при прохождении через электролит тока.

**ПЕРВЫЙ ЗАКОН ФАРАДЕЯ:** масса  $m$  выделившегося на электроде вещества пропорциональна заряду  $q$ , прошедшему через электролит:

$$m = k q = k I t, \quad (2.28)$$

где  $I$  – ток, прошедший через электролит;  $t$  – время протекания тока,  $k$  – электрохимический эквивалент.

**ВТОРОЙ ЗАКОН ФАРАДЕЯ:** электрохимические эквиваленты веществ  $k$  пропорциональны химическим эквивалентам  $\frac{A}{n}$ :

$$k = \frac{1}{F} \frac{A}{n}, \quad (2.29)$$

где  $A$  – атомная масса вещества;  $n$  – его валентность;  $F$  – число Фарадея.

**ОБОБЩЕННЫЙ ЗАКОН ФАРАДЕЯ:**

$$m = \frac{1}{F} \frac{A}{n} q = \frac{1}{F} \frac{A}{n} I t. \quad (2.30)$$

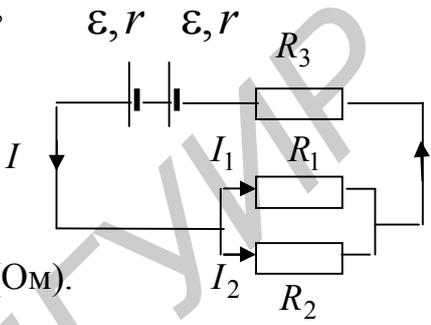
### 2.4. Методические указания

Расчет электрических цепей:

- начертить электрическую схему, на которой указать сопротивления, токи, напряжения;
- проанализировать соединения сопротивлений;
- записать выражения для расчета сопротивлений участков цепи и полного сопротивления цепи.
- записать выражение для расчета полного тока;
- выразить токи, текущие на участках цепи, через полный ток. При расчете токов, текущих через параллельно соединенные сопротивления использовать следующие факты: а) сумма токов, входящих в узел (разветвление цепи), равна сумме токов, выходящих из узла; б) падения напряжения на параллельно соединенных сопротивлениях равны;
- полученные выражения использовать для нахождения искомой величины.

## 2.5. Примеры решения задач

Задача 2.1. Электрическая цепь состоит из двух источников, каждый с ЭДС 75 В и внутренним сопротивлением 4 Ом, и трех сопротивлений  $R_1=30$  Ом,  $R_2=20$  Ом и  $R_3=10$  Ом, включенных в цепь, как показано на рисунке. Найти ток, текущий через первое сопротивление.

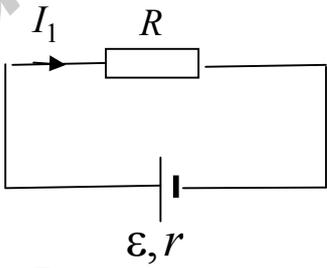
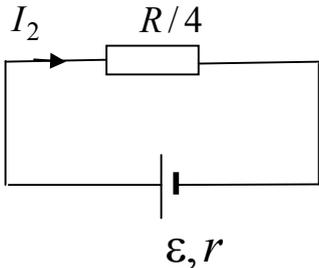
<p>Дано:  <math>\varepsilon=75</math> В  <math>r=4</math> Ом  <math>R_1=30</math> Ом  <math>R_2=20</math> Ом  <math>R_3=10</math> Ом</p>	<p><b>Решение</b>          Батарея составлена из двух одинаковых источников, следовательно,  <math>\varepsilon_{\text{бат}} = 2\varepsilon = 150</math> В,  <math>r_{\text{бат}} = 2r = 8</math> Ом.          Рассчитаем общее сопротивление цепи:</p> <div style="text-align: right;">  </div> $R = R_3 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 22 \text{ (Ом)}.$ <p>Найдем полный ток:</p> $I = \frac{2\varepsilon}{R + 2r} = 5 \text{ (А)}.$ <p>Полный ток равен <math>I = I_1 + I_2</math>.</p> <p>Так как сопротивления <math>R_1</math> и <math>R_2</math> соединены параллельно, то падение напряжения на них одно и то же:</p> $I_1 R_1 = I_2 R_2.$ <p>Составим систему и решим ее относительно искомой величины <math>I_1</math>:</p> $\begin{cases} I = I_1 + I_2, \\ I_1 R_1 = I_2 R_2. \end{cases}$ $I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I = 2 \text{ (А)}.$ <p>Ответ: <math>I_1 = 2</math> А.</p>
<p>Найти <math>I_1</math></p>	

Задача 2.2. На участке цепи, изображенной на рисунке, сопротивления резисторов  $R_1=8$  Ом,  $R_2=10$  Ом, емкость конденсатора  $C=2$  мкФ. К участку приложено напряжение  $U=6$  В. Найти заряд конденсатора  $q$ .

<p>Дано:  <math>R_1=8</math> Ом  <math>R_2=10</math> Ом</p>	<p><b>Решение</b>          Постоянный ток через конденсатор не проходит, и на участке <math>ab</math> тока нет.</p>
---	---

$C=2 \text{ мкФ}$ $U=6 \text{ В}$	<p>Сопротивления <math>R_1</math> и <math>R_2</math> соединены параллельно, поэтому общее сопротивление цепи равно <math>R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 40/9 \text{ (Ом)}</math>.</p>
<p>Найти <math>q</math></p>	<p>Полный ток <math>I = \frac{U}{R} = 1,35 \text{ (А)}</math>.</p> <p>Падение напряжения на конденсаторе равно падению напряжения на каждом из сопротивлений, так как точки <math>a</math> и <math>c</math> имеют один и тот же потенциал, аналогично один и тот же потенциал имеют точки <math>b</math> и <math>d</math>.</p> <p>Следовательно, падение напряжения на конденсаторе равно <math>U=6 \text{ В}</math>.</p> <p>Зная емкость конденсатора и напряжение на конденсаторе, находим заряд <math>q = CU = 12 \text{ (мкКл)}</math>.</p> <p>Ответ: <math>q = 12 \text{ мкКл}</math>.</p>

Задача 2.3. К источнику постоянного тока с внутренним сопротивлением  $1 \text{ Ом}$  в первом случае подключили резистор с сопротивлением  $R$ , а во втором случае – четыре таких же резистора, соединенных параллельно. Определить сопротивление  $R$ , если мощность, выделяемая в нагрузке, в первом и во втором случаях одна и та же.

<p>Дано:  <math>r=1 \text{ Ом}</math>  <math>P_1 = P_2</math></p>	<p>Решение</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p><math>I_1</math>     <math>R</math></p> <p><math>\varepsilon, r</math></p> </div> <div style="text-align: center;">  <p><math>I_2</math>     <math>R/4</math></p> <p><math>\varepsilon, r</math></p> </div> </div> <p>В первом случае мощность, выделяемая на нагрузке сопротивлением <math>R</math>, определяется как</p> $P_1 = \frac{\varepsilon^2 R}{(R + r)^2}.$ <p>Во втором случае 4 одинаковых сопротивления соединены параллельно, следовательно, сопро-</p>
---	---

	<p>тивление внешней цепи равно <math>\frac{R}{4}</math>, а мощность</p> $P_2 = \frac{\varepsilon^2 R/4}{(R/4 + r)}$
Найти $R$	<p>По условию задачи мощности равны</p> $\frac{\varepsilon^2 R}{(R + r)^2} = \frac{\varepsilon^2 R/4}{(R/4 + r)}$ <p>Решая данное уравнение, находим  <math>R = 2r = 2</math> (Ом).          Ответ: <math>R = 2</math> Ом.</p>

## 2.6. Задачи для самостоятельного решения

1. Найти в квадратных миллиметрах площадь поперечного сечения проводника сопротивлением 0,5 Ом, если удельное сопротивление материала проводника равно  $8 \cdot 10^{-8}$  Ом·м, а его длина – 50 м.
2. Два проводника имеют одинаковую длину и площадь поперечного сечения. Во сколько раз удельное сопротивление первого проводника меньше удельного сопротивления второго, если при неизменном напряжении сила тока в первом проводнике в 2 раза больше, чем во втором?
3. Моток медной проволоки имеет массу 0,34 кг и сопротивление 17,8 Ом. Определить длину проволоки. Удельное сопротивление меди равно  $1,7 \cdot 10^{-8}$  Ом·м, а плотность меди составляет 8,9 г/см<sup>3</sup>.
4. Два резистора 5 и 15 Ом соединены параллельно. Последовательно к ним подключен резистор 7 Ом. Найти сопротивление составленной цепи.
5. Два резистора 12 и 4 Ом включены параллельно. Сила тока через 12-омный резистор равна 0,25 А. Найти силу тока, текущего через второй резистор.
6. На каждом конце провода сопротивлением 3 Ом поддерживается потенциал, равный 3 В относительно Земли. Найти силу тока в проводе.
7. Участок цепи состоит из 3 проводников сопротивлением 1, 2 и 3 Ом, включенных последовательно. Найти падение напряжения на участке цепи, если сила тока в проводнике сопротивлением 1 Ом равна 2 А.
8. Участок цепи состоит из параллельно соединенных резисторов сопротивлением 12 и 4 Ом, а также включенного последовательно к ним резистора 3 Ом. Определить силу тока в 4-омном резисторе, если падение напряжения на всем участке цепи равно 12 В.

9. Два резистора 20 и 30 Ом соединены последовательно. Найти падение напряжения на 30-омном резисторе, если вольтметр с бесконечно большим сопротивлением, подключенный параллельно резистору в 20 Ом, показал 25 В.
10. Участок цепи состоит из резистора 2 Ом, включенного последовательно резисторам 5 и 20 Ом, которые соединены параллельно. Определить падение напряжения на 2-омном резисторе, если в резисторе 5 Ом течет ток силой 1 А.
11. Источник тока замкнут внешним сопротивлением 5 Ом. ЭДС источника тока равна 12 В. Определить внутреннее сопротивление источника, если сила тока в цепи равна 2 А.
12. К источнику с ЭДС 2,4 В и внутренним сопротивлением 1 Ом подключена цепь параллельно соединенных резисторов 5 и 20 Ом и резистора 3 Ом, включенного последовательно к ним. Определить силу тока через 5-омный резистор.
13. ЭДС источника тока равна 2 В, а внутреннее сопротивление составляет 1 Ом. При каком сопротивлении нагрузки в цепи будет проходить заряд 10 Кл за 1 мин?
14. Источник тока с ЭДС, равной 2,56 В, и внутренним сопротивлением 1,5 Ом замкнут проводником. Определить сопротивление проводника, если разность потенциалов между клеммами источника равна 0,16 В.
15. Источник тока с ЭДС, равной 12 В, и внутренним сопротивлением 2 Ом замкнут цепью, состоящей из сопротивления 2 Ом и конденсатора емкостью 2 мкФ, соединенных параллельно. Определить в микрокулонах величину заряда на обкладках конденсатора.
16. Источник тока замкнут внешним сопротивлением. Определить отношение ЭДС источника тока к разности потенциалов на его клеммах, если внешнее сопротивление в 4 раза больше внутреннего сопротивления источника тока.
17. Падение напряжения на клеммах источника меняется в зависимости от силы тока в цепи по закону  $U = (6 - 0,2 \cdot I)$  В, где  $I$  – сила тока в амперах. Определить силу тока короткого замыкания.
18. В цепи, состоящей из источника с ЭДС 6 В и внутренним сопротивлением 2 Ом и реостата, идет ток 0,5 А. Какой ток пойдет в цепи при уменьшении сопротивления реостата в три раза? Ответ округлить до десятых.
19. К аккумулятору с ЭДС 12,6 В подключено сопротивление, в котором протекает ток 5 А. Определить работу сторонних сил по разделению заряда в аккумуляторе за 1 мин.
20. При коротком замыкании аккумулятора сила тока оказалась равной 100 А. Найти внутреннее сопротивление аккумулятора, если его электродвижущая сила равна 6 В.
21. Сколько источников тока с ЭДС 1,5 В нужно соединить последовательно, чтобы получить напряжение 45 В?

22. Сколько понадобится гальванических элементов с ЭДС 3 В и внутренним сопротивлением 0,9 Ом, чтобы получить батарею с ЭДС 9 В и внутренним сопротивлением 0,06 Ом?
23. Мощность лампы накаливания при протекании тока 0,5 А равна 110 Вт. Определить напряжение сети, в которую включена лампа.
24. К батарее с ЭДС 2,4 В и внутренним сопротивлением 3 Ом подключены параллельно два резистора 12 и 4 Ом. Определить полезную мощность источника тока при таком включении.
25. Из двух спиралей сопротивлением 100 и 200 Ом сделали электронагреватель, мощность которого можно изменять переключением спиралей. Найти максимально возможную мощность при напряжении 220 В.
26. Полезная мощность, выделяющаяся во внешней цепи, достигает наибольшего значения 5 Вт при силе тока 5 А. Определить внутреннее сопротивление источника тока.
27. Две электрические цепи подключены к одной сети. Одна цепь образована последовательным соединением резисторов 1, 5 и 20 Ом, вторая – параллельным соединением этих же резисторов. Во сколько раз расход электроэнергии в первом случае меньше, чем во втором?
28. Двигатель мощностью 30 Вт, рассчитанный на напряжение 15 В, необходимо подключить к источнику тока, составленному из батареек с ЭДС 1,5 В и внутренним сопротивлением 0,5 Ом. Какое минимальное число батареек, соединенных последовательно, требуется для такого подключения двигателя?
29. Обмотка электродвигателя постоянного тока сделана из провода общим сопротивлением 2 Ом. По обмотке работающего двигателя, включенного в сеть напряжением 110 В, течет ток 11 А. Определить в процентах КПД двигателя.
30. К источнику подключен реостат. При сопротивлении реостата 4 и 9 Ом получается одинаковая полезная мощность. Вычислить внутреннее сопротивление источника.
31. Две электрических цепи подключены к одной сети. Одна цепь образована последовательным соединением резисторов 1, 5 и 20 Ом, вторая цепь – параллельным. Во сколько раз расход электроэнергии в первом случае меньше, чем во втором?
32. Сколько киловатт электроэнергии расходуется на нагревание проводов ЛЭП, если суммарная мощность потребителей энергии 3000 МВт при напряжении 400 кВ, а падение напряжения на проводах 100 В?
33. Два резистора сопротивлением 2 и 5 Ом соединены параллельно и включены в сеть постоянного напряжения. Какая мощность выделяется на сопротивлении 2 Ом, если на сопротивлении 5 Ом выделяется мощность 20 Вт?
34. Мотор подключен к сети напряжением 220 В. Определить работу, совершаемую мотором при прохождении по его обмотке заряда 2 Кл, если вся электрическая энергия превратилась в механическую работу.

35. На плитке мощностью 0,5 кВт стоит чайник, в котором находится 1 кг воды при температуре 293 К. Вода закипает через 20 мин после включения плитки. Определить в килоджоулях потери тепла. Удельная теплоемкость воды равна 4200 Дж/(кг·К).
36. Электрический нагреватель работает от сети постоянного напряжения 120 В при силе тока 5 А и за 20 мин нагревает 1,5 кг воды на 84 °С. Определить в процентах КПД нагревателя. Удельная теплоемкость воды равна 4200 Дж/(кг·К).
37. ЭДС источника тока равна 1,6 В, а внутреннее сопротивление составляет 0,5 Ом. Определить в процентах КПД источника тока при силе тока 2,4 А.
38. КПД источника тока равен 0,6, а мощность, выделяющаяся во внешней цепи, равна 20 Вт. Найти количество теплоты, выделившееся в источнике тока за 5 мин.
39. Во сколько раз КПД линии электропередачи при напряжении 200 кВ больше КПД при напряжении 100 кВ, если сопротивление линии равно 400 Ом, а передаваемая в линию мощность равна 10 000 кВт?
40. Источник тока замкнут внешним сопротивлением. Определить в процентах КПД источника тока, если ЭДС источника равна 10 В, а падение напряжения на клеммах источника составляет 6,5 В.
41. Источник тока замыкается на сопротивление 4 Ом, а затем на сопротивление 9 Ом. На сколько процентов КПД источника тока во втором случае больше, чем в первом, если на этих сопротивлениях за одно и то же время выделяется одинаковое количество теплоты?
42. Вода, падая с высоты 10 м, вращает ротор генератора электрического тока. Найти в процентах КПД гидроэлектростанции, если ее мощность 500 кВт при расходе воды 20 тонн в секунду.
43. На сколько километров можно передать электроэнергию от источника ЭДС 5 кВ при помощи провода с удельным сопротивлением  $2 \cdot 10^{-8}$  Ом·м и площадью поперечного сечения 1 мм<sup>2</sup> так, чтобы на нагрузке с сопротивлением 1,6 кОм выделялась мощность 10 кВт. Внутренним сопротивлением источника тока пренебречь.
44. Амперметр, зашунтированный сопротивлением 0,2 Ом и присоединенный к полюсам гальванического элемента с ЭДС 1 В и внутренним сопротивлением 0,1 Ом, показывает ток 5 А. Каково будет показание амперметра, если отключить шунт?
45. Требуется покрыть электролитическим путем металлическое изделие слоем серебра толщиной 11 мкм. Сколько времени надо пропускать ток силой 0,5 А, если площадь поверхности изделия 200 см<sup>2</sup>? Плотность серебра  $1,05 \cdot 10^4$  кг/м<sup>3</sup>, электрохимический эквивалент считать равным  $1,1 \cdot 10^{-6}$  кг/Кл.
46. При какой плотности тока в растворе азотнокислого серебра толщина отложившегося слоя серебра растет со скоростью 3,96 мм/ч? Плотность

серебра –  $1,05 \cdot 10^4$  кг/м<sup>3</sup>, электрохимический эквивалент считать равным  $1,1 \cdot 10^{-6}$  кг/Кл.

47. За какое время ток в 1 А разложит 1 г воды? Число Фарадея принять равным 96498 Кл/моль. Атомная масса кислорода равна 16 г/моль, валентность –2.

48. При электролизе воды через ванну протекло 5000 Кл. Какова температура выделившегося кислорода, если он находится в  $2,5 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup> при давлении  $1,66 \cdot 10^5$  Па? Число Фарадея принять равным 96 500 Кл/моль. Атомная масса кислорода 16 г/моль, валентность –2.

### 3. МАГНЕТИЗМ

Магнитное поле проявляет себя в действии на движущиеся электрические заряды (токи).

#### 3.1. Основные характеристики и формулы

Вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  – силовая характеристика магнитного поля. Направление  $\vec{B}$  связано с направлением тока правилом правого винта.

Принцип суперпозиции магнитных полей: вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  поля, созданного несколькими источниками, равен векторной сумме магнитных индукций полей, созданных каждым источником в отдельности:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n. \quad (3.1)$$

Значения магнитной индукции:

а) в центре кругового витка с током  $I$

$$B = \frac{\mu_0 \mu I}{2R}, \quad (3.2)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $\mu$  – магнитная проницаемость среды;  $R$  – радиус витка;

б) на расстоянии  $r$  от прямого бесконечно длинного проводника, по которому течет ток  $I$ ,

$$B = \frac{\mu_0 \mu I}{2\pi r}; \quad (3.3)$$

в) в центре однослойной цилиндрической катушки (соленоида), радиус  $r$  которой значительно меньше ее длины  $l$ ,

$$B = \mu_0 \mu n I, \quad (3.4)$$

где  $n$  – число витков на единицу длины соленоида;  $I$  – сила тока в соленоиде.

Сила Ампера  $F$  – сила, действующая на проводник с током, помещенный в магнитное поле. Для прямого проводника, помещенного в однородное магнитное поле,

$$F = IlB \sin \alpha, \quad (3.5)$$

где  $I$  – ток в проводнике;  $l$  – длина проводника;  $B$  – модуль вектора магнитной индукции;  $\alpha$  – угол между направлением магнитного поля и направлением тока. Направление силы Ампера связано с направлением тока и магнитного поля правилом левой руки, причем вектор силы всегда перпендикулярен плоскости, в которой лежат проводник с током и вектор магнитной индукции.

Сила взаимодействия двух бесконечно длинных проводников с токами  $I_1$  и  $I_2$ . На каждый элемент длиной  $l$  проводников действует сила

$$F = \frac{\mu_0 \mu I_1 I_2 l}{2\pi d}, \quad (3.6)$$

где  $d$  – расстояние между проводниками.

Сила Лоренца  $F_{\text{л}}$  (магнитная составляющая) – сила, действующая со стороны магнитного поля с индукцией  $B$  на движущуюся со скоростью  $v$  частицу с зарядом  $q$ , равна

$$F_{\text{л}} = qvB \sin \alpha, \quad (3.7)$$

где  $\alpha$  – угол между векторами  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ .

Направление силы Лоренца связано с направлением скорости и вектора магнитной индукции правилом левой руки для положительно заряженных частиц. В каждой точке траектории заряженной частицы сила Лоренца перпендикулярна векторам  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ .

### 3.2. Явление электромагнитной индукции

Явление электромагнитной индукции проявляется в появлении в проводящем контуре индукционного тока (ЭДС) при изменении магнитного потока, пронизывающего этот контур.

Поток вектора магнитной индукции однородного поля через плоскую поверхность площадью  $S$  равен

$$\Phi = BS \cos \alpha, \quad (3.8)$$

где  $\alpha$  – угол между вектором  $\vec{B}$  и нормалью к площади  $S$  (рис. 3.1).

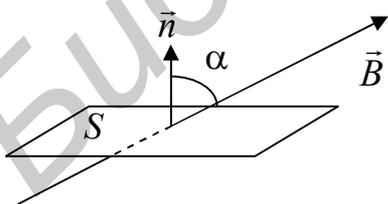


Рис. 3.1

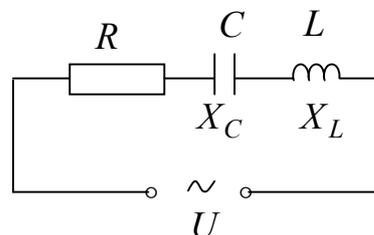


Рис. 3.2

Поток сцепления – магнитный поток, связанный с катушкой площадью  $S$ , имеющей  $N$  витков:

$$\Phi_c = N\Phi. \quad (3.9)$$

ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ (закон Фарадея): величина ЭДС индукции  $\mathcal{E}_i$  определяется скоростью изменения магнитного потока:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (3.10)$$

Если катушка содержит  $N$  витков, то

$$\mathcal{E}_i = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (3.11)$$

*Разность потенциалов, возникающая на концах проводника при равномерном движении проводника длиной  $l$  в однородном магнитном поле с индукцией  $B$ , при котором проводник пересекает линии магнитной индукции, равна*

$$\varphi_1 - \varphi_2 = lvB \sin \alpha, \quad (3.12)$$

где  $v$  – скорость движения проводника;  $\alpha$  – угол между векторами  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ .

*Явление самоиндукции* – возникновение ЭДС индукции в контуре при изменении магнитного потока, создаваемого током самого контура.

*Магнитный поток, сцепленный с жестким контуром, по которому течет ток, равен*

$$\Phi_c = LI, \quad (3.13)$$

где  $L$  – индуктивность контура.

*Индуктивность длинного соленоида малого диаметра равна*

$$L = \frac{\mu_0 \mu n^2 S}{l}, \quad (3.14)$$

где  $n$  – число витков соленоида;  $l$  – длина соленоида;  $S$  – площадь поперечного сечения.

*ЭДС самоиндукции для жесткого контура равна*

$$\mathcal{E}_c = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}. \quad (3.15)$$

*Энергия, запасенная в контуре индуктивностью  $L$  с силой тока  $I$ :*

$$W = \frac{LI^2}{2}. \quad (3.16)$$

*Энергия однородного магнитного поля:*

$$W = \frac{B^2}{2\mu\mu_0}V, \quad (3.17)$$

где  $B$  – магнитная индукция поля;  $\mu$  – магнитная проницаемость среды;  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $V$  – объем.

### 3.3. Переменный ток

ЭДС индукции, возбуждаемая в рамке площадью  $S$ , с числом витков  $n$  при ее равномерном вращении с угловой скоростью  $\omega$  в магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$  равна

$$\varepsilon = \varepsilon_{\max} \sin \omega t, \quad (3.18)$$

где  $\varepsilon_{\max} = nSB\omega$ .

*Емкостное сопротивление*

$$X_C = \frac{1}{\omega C}. \quad (3.19)$$

*Индуктивное сопротивление*

$$X_L = \omega L. \quad (3.20)$$

*Полное сопротивление цепи переменного тока*, содержащей последовательно соединенные активное сопротивление  $R$ , емкостное сопротивление  $X_C$ , индуктивное сопротивление  $X_L$  (рис.3.2), равно

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}. \quad (3.21)$$

*Действующее (эффективное) значение напряжения* в цепи переменного тока

$$U_{\text{д}} = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}}, \quad (3.22)$$

где  $U_{\max}$  – амплитуда напряжения.

*Действующее (эффективное) значение силы тока* в цепи переменного тока

$$I_{\text{д}} = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}}, \quad (3.23)$$

где  $I_{\max}$  – амплитуда тока.

*Коэффициент трансформации* равен

$$k = \frac{n_1}{n_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}, \quad (3.24)$$

где  $n_1$  – число витков в первичной обмотке трансформатора;  $n_2$  – число витков во вторичной обмотке;  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  – ЭДС индукции, возникающие соответственно в первичной и вторичной обмотках.

### 3.4. Методические указания

А. Силовое воздействие магнитного поля на проводники с током и заряженные частицы:

- сделать чертеж, указать на нем направление векторов  $\vec{B}$  и  $\vec{E}$ ;
- определить и указать на чертеже направление действующих на про-

водник или частицу сил;

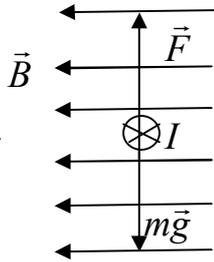
- записать уравнение динамики, подставить в них выражения сил;
- решить полученные уравнения относительно искомой величины.

Б. Явление электромагнитной индукции:

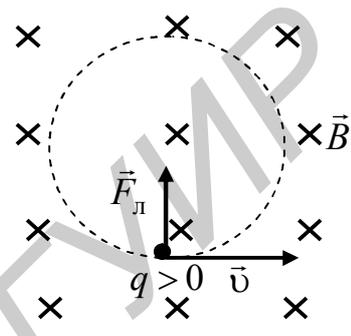
- выяснить причины изменения магнитного потока;
- записать выражение, определяющее изменение потока;
- подставить выражение  $\Delta\Phi$  в исходную формулу закона электромагнитной индукции;
- в случае необходимости записать дополнительные условия, решить систему уравнений относительно искомой величины.

### 3.5. Примеры решения задач

Задача 3.1. На прямолинейный проводник с площадью сечения  $S=0,2 \text{ см}^2$  в однородном магнитном поле с индукцией  $B=0,1 \text{ Тл}$  действует максимально возможная для данного поля сила Ампера  $F$ , численно равная силе тяжести. Определить плотность  $\rho$  материала проводника, если сила тока  $I$  равна 5 А.

<p>Дано:  <math>S=0,2 \text{ см}^2</math>  <math>B=0,1 \text{ Тл}</math>  <math>F_{\max} = mg</math>  <math>I=5 \text{ А}</math></p>	<p>Решение</p> <p>Сделаем чертеж, на котором укажем направления магнитного поля, тока и сил, действующих на проводник. Запишем выражение для максимального значения силы Ампера</p> $F_{\max} = IlB, \text{ где } l - \text{длина проводника.}$ <p>По условию</p> $F_{\max} = mg.$ <p>Следовательно,</p> $IlB = mg.$ <p>Выразим массу через плотность <math>m = \rho V = \rho Sl</math>.</p> $IlB = g\rho Sl.$ <p>Найдем <math>\rho = \frac{IB}{gS} = 2500 (\text{кг/м}^3)</math>.</p> <p>Ответ: 2500 кг/м<sup>3</sup>.</p>
<p>Найти <math>\rho</math></p>	

Задача 3.2. Пылинка массой  $m=10^{-13} \text{ кг}$  и зарядом  $q = 10^{-10} \text{ Кл}$  влетает в однородное магнитное поле с индукцией  $B = 0,5 \text{ Тл}$  перпендикулярно силовым линиям. Определить модуль ускорения  $a$  пылинки. Скорость пылинки равна  $v = 10 \text{ м/с}$ . Силой тяжести пренебречь.

<p>Дано:  <math>m = 10^{-13}</math> кг  <math>q = 10^{-10}</math> Кл  <math>B = 0,5</math> Тл  <math>v = 10</math> м/с</p> <p>Найти <math>a</math></p>	<p>Решение</p> <p>Сделаем чертеж, на котором укажем направление скорости частицы, вектора магнитной индукции и силы Лоренца. Так как частица влетает перпендикулярно силовым линиям, то сила Лоренца играет роль центростремительной силы и частица движется по окружности.</p> <p>Запишем динамическое уравнение движения частицы:</p> $\frac{mv^2}{R} = qvB.$ <p>Центростремительное ускорение <math>a</math> частицы равно</p> $a = \frac{v^2}{R} = \frac{qvB}{m} = 5000 \text{ (м/с)}.$ <p>Ответ: 5000 м/с.</p> 
--	---

Задача 3.3. Виток площадью  $S = 100 \text{ см}^2$  расположен перпендикулярно силовым линиям магнитного поля. Определить модуль индукции поля  $B$ , если при повороте витка на угол  $\alpha = 90^\circ$  относительно оси, лежащей в плоскости витка, в течение  $t = 0,1$  с в нем возникает средняя ЭДС, равная  $\varepsilon = 0,1$  В.

<p>Дано:  <math>S = 100 \text{ см}^2</math>  <math>\alpha = 90^\circ</math>  <math>t = 0,1</math> с  <math>\varepsilon = 0,1</math> В</p>	<p>Решение</p> <p>Причиной изменения магнитного потока через виток является поворот витка, т. е. изменение его ориентации относительно силовых линий магнитного поля.</p>
---	---

Найти $B$	<p>В начальный момент времени поток через виток равен</p> $\Phi_1 = BS \cos 0^\circ = BS.$ <p>В результате поворота магнитный поток изменится и станет равным</p> $\Phi_2 = BS \cos 90^\circ = 0.$ <p>Изменение потока</p> $\Delta\Phi = -BS.$ <p>Подставим в формулу для ЭДС индукции</p> $\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{BS}{t}.$ <p>Найдем искомую величину</p> $B = \frac{\mathcal{E}_i t}{S} = 1(\text{Тл}).$ <p>Ответ: 1 Тл.</p>
-----------	--

### 3.6. Задачи для самостоятельного решения

1. При наложении двух однородных магнитных полей модуль вектора индукции результирующего поля оказался равным 0,4 Тл. Определить минимальное значение модуля магнитной индукции второго поля, если модуль индукции первого поля равен 0,6 Тл.
2. При наложении двух однородных магнитных полей модуль вектора индукции результирующего поля оказался равным 0,5 Тл. Определить максимально возможное значение модуля индукции второго поля, если модуль индукции первого поля равен 0,2 Тл.
3. Магнитное поле образовано наложением двух однородных полей с индукцией 0,3 и 0,4 Тл, силовые линии которых взаимно перпендикулярны. Определить модуль вектора магнитной индукции результирующего поля.
4. Два параллельных длинных проводника с токами 10 А притягиваются с силой 0,2 Н на каждый метр длины. Определить модуль вектора магнитной индукции поля, создаваемого одним проводником в месте расположения другого.
5. Два длинных прямых провода, по которым текут равные токи противоположного направления находятся в вакууме на расстоянии 1 м. Определить в миллитеслах модуль индукции магнитного поля в точке, отстоящей на 0,5 м от проводников, если при отсутствии одного из них модуль индукции в этой точке равен 0,2 мТл.

6. По проводнику длиной 0,5 м течет ток 2 А. Определить максимальное значение модуля силы Ампера, действующей на этот проводник со стороны однородного магнитного поля индукцией 0,2 Тл.
7. Прямолинейный проводник длиной 0,5 м, по которому течет ток 1 А, расположен под углом  $60^\circ$  к силовым линиям однородного магнитного поля с индукцией 0,5 Тл. Определить проекцию силы Ампера на ось, направленную вдоль направления тока.
8. Проволочный квадрат с током находится в однородном магнитном поле. Плоскость квадрата перпендикулярна силовым линиям. Определить в градусах угол между силами Ампера, действующими на противоположные стороны квадрата.
9. Прямой проводник длиной 1 м, по которому течет ток 3 А, помещен в однородное магнитное поле с индукцией 0,2 Тл. Определить модуль силы, действующей на проводник со стороны поля, если направление тока составляет с линиями магнитной индукции угол  $30^\circ$ .
10. В горизонтальном однородном магнитном поле с индукцией 0,01 Тл находится линейный проводник, масса единицы длины которого равна 0,01 кг. Какой ток должен протекать по проводнику, чтобы он висел не падая?
11. На проводник с током действует со стороны однородного магнитного поля с индукцией 0,1 Тл сила Ампера, равная 3 Н. Определить модуль силы Ампера, если индукцию поля увеличить на 0,2 Тл, а силу тока в проводнике и его ориентацию оставить без изменения.
12. Два связанных вместе изолированных проводника длиной по 10 см расположены перпендикулярно силовым линиям магнитного поля с индукцией 0,2 Тл. Найти модуль равнодействующей сил Ампера, если в проводниках токи 7 и 9 А текут навстречу друг другу.
13. Прямой проводник длиной 10 см, по которому течет ток 50 А, помещен параллельно полюсам электромагнита, создающего однородное поле с индукцией 0,1 Тл. Найти модуль силы взаимодействия проводника и магнита.
14. Параллельно полюсам электромагнита, создающего однородное магнитное поле, расположен проводник с током. Найти в градусах минимальный угол поворота магнита, при котором сила Ампера, действующая на проводник, уменьшится в 2 раза.
15. Заряженная частица движется под углом  $30^\circ$  к линиям индукции однородного магнитного поля. Определить в градусах угол между вектором скорости частицы и направлением силы Лоренца.
16. Частица движется в однородном магнитном поле по окружности. Определить радиус окружности, если заряд и модуль импульса частицы равны 1 мкКл и  $10^{-8}$  Н·с, а модуль вектора индукции магнитного поля равен 0,1 Тл.
17. Частица с зарядом 5 мкКл движется со скоростью 10 км/с в положительном направлении оси X в однородном магнитном поле с индукцией

- 0,1 Тл. Линии индукции направлены вдоль оси  $Y$ . Определить проекцию силы Лоренца на ось  $X$ .
18. Частица массой  $10^{-13}$  кг и зарядом  $10^{-10}$  Кл движется по окружности в однородном магнитном поле с индукцией 0,2 Тл. Определить угловую скорость частицы.
  19. На частицу действует со стороны однородного магнитного поля сила Лоренца, равная 6 мкН. Определить в микроньютонах силу Лоренца, действующую со стороны поля на эту частицу, если модуль ее скорости станет в 2 раза больше, а направление движения не изменится.
  20. Две частицы влетают под углом  $30^\circ$  к линиям индукции однородного магнитного поля. Во сколько раз модуль силы Лоренца для первой частицы больше модуля силы Лоренца для второй, если заряд и модуль скорости первой частицы в 2 раза больше, чем у второй?
  21. На частицу, влетающую перпендикулярно линиям индукции однородного магнитного поля, действует сила Лоренца, равная по модулю 7,2 мкН. На сколько микроньютонов уменьшится сила Лоренца, если вектор скорости частицы направить параллельно линиям поля?
  22. Частица с зарядом 2 мКл движется со скоростью 4 км/с в отрицательном направлении оси  $X$  в однородном магнитном поле с индукцией 0,2 Тл. Линии поля направлены вдоль оси  $Y$ . Определить проекцию силы Лоренца на ось  $Y$ .
  23. Заряженная частица влетает в магнитное поле под углом  $45^\circ$  к линиям индукции. Определить проекцию силы Лоренца на направление, параллельное линиям поля, если заряд частицы и модуль скорости равны 0,1 мКл и 10 км/с.
  24. Невесомый заряд движется прямолинейно со скоростью 25 м/с в однородных электрическом и магнитном полях, силовые линии которых взаимоперпендикулярны. Определить отношение модуля вектора магнитной индукции к модулю вектора напряженности электрического поля, если вектор скорости перпендикулярен этим векторам.
  25. Тело, у которого отношение заряда к массе равно 0,005 Кл/кг, движется прямолинейно вдоль поверхности Земли перпендикулярно силовым линиям однородного магнитного поля с индукцией 0,2 Тл. Определить модуль скорости тела.
  26. Пылинка массой  $10^{-13}$  кг и зарядом  $10^{-10}$  Кл влетает в однородное магнитное поле с индукцией 0,5 Тл перпендикулярно силовым линиям. Определить модуль ускорения пылинки. Скорость пылинки равна 10 м/с. Силой тяжести пренебречь.
  27. Заряженная частица влетает в однородное магнитное поле под углом  $45^\circ$  к силовым линиям и движется по спирали. Определить радиус спирали, если за один оборот частица смещается вдоль силовых линий поля на 6,28 см.

28. Электрон движется по окружности в однородном магнитном поле. Во сколько раз возрастет частота обращения электрона при увеличении индукции поля в 4 раза?
29. В пучок, движущийся по прямой со скоростью 1 км/с, входят 2 вида частиц. Отношение заряда к массе у одних частиц  $10^8$  Кл/кг, а у других – в 2 раза больше. Пучок попадает в магнитное поле с индукцией 1 мТл и, описав полуокружности, выходит, образовав 2 пучка. Определить расстояние между образовавшимися пучками.
30. Магнитное поле можно представить графически с помощью силовых линий. Во сколько раз возрастет поток магнитной индукции через площадь  $0,5 \text{ м}^2$  при увеличении густоты силовых линий в 2 раза, если ориентация силовых линий относительно площадки не изменяется?
31. Силовые линии однородного магнитного поля пересекают плоскую площадку под прямым углом. Во сколько раз уменьшается поток магнитной индукции через площадку при ее повороте на  $60^\circ$  относительно оси, лежащей в плоскости площадки?
32. Поток магнитной индукции через площадку, расположенную в магнитном поле, равен 0,3 Вб. Определить модуль изменения магнитного потока при повороте площадки на  $180^\circ$  относительно оси, лежащей в плоскости площадки.
33. Поток магнитной индукции, пронизывающий плоскость квадрата, равен 0,2 Вб. Определить поток магнитной индукции, пронизывающий плоскость этого квадрата, если индукция однородного магнитного поля возрастет на 0,2 Тл и станет равной 0,3 Тл. Ориентация квадрата не меняется.
34. Из тонкой проволоки длиной 1 м сделан плоский контур. Определить в милливеберах максимальный поток магнитной индукции, пронизывающий плоскость контура, если он находится в однородном магнитном поле с индукцией 0,157 Тл.
35. Плоскость кругового витка перпендикулярна линиям индукции магнитного поля. Определить среднее значение ЭДС индукции в витке при уменьшении индукции поля за 0,01 с на 1 Тл. Радиус витка равен 10 см.
36. Поток магнитной индукции через площадь, ограниченную замкнутым контуром, уменьшается со скоростью 3 Вб/с. Определить среднее значение ЭДС индукции, возникающей в контуре.
37. Модуль вектора магнитной индукции однородного поля меняется по закону  $B=(5,15 - 0,1t)$  Тл, где  $t$  – время в секундах. Найти в микровольтах максимальную ЭДС индукции в круговом контуре радиусом 5 см, расположенном в данном поле.
38. Кольцо радиусом 1м и сопротивлением 0,1 Ом помещено в однородное магнитное поле с индукцией 0,1 Тл. Плоскость кольца перпендикулярна вектору индукции поля. Какой заряд пройдет через поперечное сечение кольца при исчезновении поля?
39. Плоскость кругового контура параллельна полюсам электромагнита. Оп-

- ределить ЭДС индукции при уменьшении модуля вектора магнитной индукции однородного поля между полюсами на 3,14 Тл за 0,5 с. Длина контура равна 1 м.
40. Сколько витков должна иметь катушка, чтобы при изменении магнитного потока внутри нее от 0,024 до 0,056 Вб за промежуток времени 0,32 с в катушке возникла средняя ЭДС индукции 10 В?
  41. Источник тока с ЭДС 1 В замкнут на прямолинейный проводник длиной 1 м с помощью гибких проводов. С какой минимальной скоростью перемещается проводник в магнитном поле с индукцией 0,1 Тл, если ток в цепи отсутствует?
  42. Виток площадью  $100 \text{ см}^2$  расположен перпендикулярно силовым линиям магнитного поля. Определить модуль индукции поля, если при повороте витка на  $90^\circ$  относительно оси, лежащей в плоскости витка, в течение 0,1 с в нем возникает средняя ЭДС, равная 0,1 В.
  43. В однородном магнитном поле с индукцией 0,05 Тл вращается стержень длиной 1 м с постоянной угловой скоростью 20 рад/с. Определить разность потенциалов, возникающую на концах стержня, если ось вращения проходит через конец стержня параллельно линиям индукции магнитного поля и перпендикулярно стержню.
  44. Магнитная индукция в зазоре электромагнита меняется по закону  $B=0,01\cos 2\pi t$ , где  $B$  – в теслах,  $t$  – время в секундах. Определить среднюю ЭДС индукции в контуре площадью  $1 \text{ м}^2$ , расположенном параллельно полюсам магнита, за промежуток времени 0,5 с от начала включения электромагнита.
  45. По П-образному проводу, расположенному в горизонтальной плоскости в вертикальном магнитном поле, перемещается без трения со скоростью 1 м/с под действием внешней силы замыкающая провод переключка. Определить модуль внешней силы, если в образовавшемся контуре каждую секунду выделяется 4 Дж теплоты.
  46. Поток магнитной индукции через неподвижный контур сопротивлением 2 Ом меняется в интервале времени от 0 до 2 с по закону:  $\Phi=2(2-t)$  Вб, где  $t$  – время в секундах. Определить количество теплоты, выделяющейся в контуре за это время. Индуктивностью контура пренебречь.
  47. При изменении силы тока в катушке со скоростью 1000 А/с на ее концах возникает ЭДС самоиндукции 13 В. Определить в миллигенри индуктивность катушки.
  48. Катушку деформируют, в результате чего ее индуктивность уменьшается по закону  $L = (0,1 - 0,004t)$  Гн, где  $t$  – время в секундах. Найти ЭДС самоиндукции, если по катушке течет постоянный ток 70 А.
  49. В катушке, состоящей из 75 витков, магнитный поток равен 4,5 мВб. За какое время индукция поля уменьшается до нуля, если средняя ЭДС, возникающая при этом, равна 0,75 В?
  50. Определить энергию магнитного поля катушки, состоящей из 200 витков

- провода, если при силе тока 4 А в ней возникает магнитный поток 10 мВб.
51. При некотором изменении силы тока в замкнутом проводящем контуре возникает ЭДС самоиндукции, равная 3,1 В. Определить ЭДС самоиндукции в этом контуре, если скорость изменения силы тока увеличить в 3 раза.
  52. Сила тока в контуре меняется по закону  $I=(80 - 40t)$  А, где  $t$  – время в секундах. Найти ЭДС самоиндукции, если при  $t=0$  поток магнитной индукции, пронизывающий контур, равен 0,2 Вб.
  53. Во сколько раз возрастет ЭДС индукции, возникающая в замкнутой проводящей рамке, находящейся в однородном магнитном поле, если увеличить частоту ее вращения на 50 %?
  54. Прямоугольный контур сделан из проволоки длиной 2 м и помещен в однородное поле с индукцией 0,1 Тл. Определить максимально возможное значение средней ЭДС индукции, возникающей в контуре при выключении поля за 0,05 с.
  55. На катушке сопротивлением 5 Ом и индуктивностью 25 мГн поддерживается постоянное напряжение 50 В. Сколько энергии выделится при размыкании цепи катушки?
  56. Катушка длиной 50 см и площадью поперечного сечения  $2 \text{ см}^2$  имеет индуктивность 0,2 мкГн. При какой силе тока энергия единицы объема магнитного поля внутри катушки равна  $1 \text{ мДж/м}^3$ .
  57. При протекании тока 15,7 А по обмотке длинной катушки диаметром 2 см и индуктивностью 300 мкГн внутри нее возбуждается однородное магнитное поле. Найти модуль вектора индукции, если число витков в катушке равно 500.
  58. Определить энергию магнитного поля катушки, в которой при токе 7,5 А магнитный поток равен 4 мВб. Число витков в катушке 100.
  59. Во сколько раз возрастет энергия магнитного поля катушки с регулируемой индуктивностью при увеличении индуктивности на 25 % при неизменной силе тока?
  60. Найти частоту вращения прямоугольной рамки в однородном поле с индукцией 0,5 Тл, если амплитуда индуцируемой в рамке ЭДС равна 31,4 В. Площадь рамки  $200 \text{ см}^2$ , число витков 20.
  61. Индуктивное сопротивление катушки 500 Ом, эффективное напряжение сети, в которую включена катушка, 100 В, частота 1 кГц. Найти амплитуду тока в цепи. Ответ привести в миллиамперах.
  62. В цепь последовательно включены резистор сопротивлением 1 кОм, катушки индуктивностью 0,5 Гн и конденсатор емкостью 1 мкФ. Во сколько раз при частоте тока 10 кГц емкостное сопротивление меньше индуктивного?
  63. К зажимам генератора присоединен конденсатор емкостью 0,1 мкФ. Найти амплитуду напряжения на зажимах, если амплитуда тока 2,2 А, а период тока 0,314 мс.

64. В сеть переменного тока с эффективным напряжением 120 В последовательно включены проводник сопротивлением 20 Ом и катушка индуктивностью 100 мГн. Найти квадрат частоты тока, если амплитуда тока в цепи 6 А.
65. В цепь последовательно включены резистор сопротивлением 1 кОм, катушка индуктивностью 0,5 Гн и конденсатор емкостью 1 мкФ. Найти полное сопротивление цепи при частоте тока  $100\sqrt{5}$  Гц.
66. Найти индуктивность катушки, если амплитуда напряжения на ее концах 157 В, амплитуда тока в ней 10 А и частота тока 50 Гц.
67. Цепь состоит из последовательно включенных конденсатора емкостью 1 мкФ и катушки индуктивностью 0,4 Гн. При какой частоте тока полное сопротивление цепи равно нулю?
68. Найти коэффициент мощности  $\cos\varphi$  электрической цепи, если генератор отдает в цепь мощность 8 кВт, амплитуда тока в цепи 100 А и амплитуда напряжения на зажимах генератора 200 В.
69. От генератора переменного тока питается электропечь с сопротивлением 22 Ом. Найти количество теплоты, выделяемое печью за время 1 с, если амплитуда тока 10 А.
70. Ток в первичной обмотке трансформатора равен 0,5 А, напряжение на ее концах 220 В. Ток во вторичной обмотке трансформатора равен 11 А, напряжение на ее концах 9,5 В. Найти в процентах КПД трансформатора.
71. Первичная обмотка понижающего трансформатора с коэффициентом трансформации 10 включена в сеть переменного тока с напряжением 220 В. Сопротивление вторичной обмотки 2 Ом, ток в ней 3 А. Найти напряжение на зажимах вторичной обмотки.
72. Первичная обмотка понижающего трансформатора включена в сеть переменного тока с напряжением 220 В. Напряжение на зажимах вторичной обмотки 20 В, ее сопротивление 1 Ом, ток в ней 2 А. Найти коэффициент трансформации.
73. Первичная обмотка понижающего трансформатора включена в сеть переменного тока с напряжением 220 В. Напряжение на зажимах вторичной обмотки 18 В, ее сопротивление 1 Ом, ток в ней 2 А. Найти в процентах КПД трансформатора.
74. Первичная обмотка понижающего трансформатора с коэффициентом трансформации 10 включена в сеть переменного тока с напряжением 120 В. Сопротивление вторичной обмотки 1,2 Ом, ток в ней 5 А. Найти сопротивление нагрузки трансформатора.

## ОТВЕТЫ

### 1. Электростатика

1,5 нКл. 2. 6 мКл. 3. 200 мкКл. 4. 10. 5. 0,06 м. 6. 1,25 м. 7. 3. 8. 15 Н. 9. 4.  
9,8 м/с<sup>2</sup> 11. 3. 12. 0. 13. 0,11 Н. 14. 900 В/м. 15. 900 В/м. 16. 144 В/м.  
17. 4,05 В/м. 18. 11м/с<sup>2</sup> 19. 0,05м. 20. 0. 21. 10мкКл. 22. 2. 23. 450 В. 24. 4.  
25. 2,5. 26. 3 В. 27. 150 В/м. 28. 900 В. 29. 24 В. 30.-45 Дж. 31. 3 Дж. 32. 10 В.  
33. 0. 34.0,5 Кл. 35. 18 Дж. 36. 150 В. 37. 2 мкДж. 38. 100 мкДж.  
39. 541 мДж. 40. 0,1 мкс. 41. 500 Дж. 42. 1,5 мФ. 43. 3. 44. 4,5. 45. 50 В.  
46. 7,5 В. 47. 180 В. 48. 90 В. 49. 105 В/м. 50. 16 мкФ. 51. 4. 52. 4 Дж.  
53. 0.07 Дж. 54. 60 В. 55. 4,7 Дж. 56. 8 мм. 57. 16 нКл. 58. 3,36 мКл.  
59. 600 В/м. 60. 50 эВ.

### 2. Электрический ток

1. 8 мм<sup>2</sup>. 2. 2. 3. 200 м. 4. 10,75 Ом. 5. 0,75 А. 6. 0. 7. 12 В. 8. 1,5 А. 9. 37,5 В.  
10. 2,5 В. 11. 1 Ом. 12. 0 24 А. 13. 11 Ом. 14. 0,1 Ом. 15. 12 мкКл. 16. 1,25.  
17. 30 А. 18. 1,1 А. 19. 3780 Дж. 20. 0,06 Ом. 21. 30. 22. 135. 23. 220 В.  
24. 048 Вт. 25. 726 Вт. 26. 0,20 м. 27. 32,5. 28. 30. 29. 80 %. 30. 6 Ом. 31. 25 %.  
32. 750 кВт. 33. 50Вт. 34. 440 Дж. 35. 264 кДж. 36. 73.5 %. 37. 25 %.  
38. 4000 Дж. 39. 1,5. 40. 65 %. 41. 20 %. 42. 25 %. 43. 10 км. 44. 6 А.  
45. 4200с. 46. 10500 А/м<sup>2</sup> 47. 10722 с. 48. 386 К.

### 3. Магнетизм

1. 0.2 Тл. 2. 0,7 Тл. 3. 0,5 Тл. 4. 0,02 Тл. 5. 0,4 мТл. 6. 0.2 Н. 7. 0. 8. 180°.  
9. 0,3 Н. 10. 10 А. 11. 9 Н. 12. 0,04 Н. 13. 0,5 Н. 14. 60°. 15. 90°. 16. 0,1 м.  
17. 0. 18. 200 рад/с. 19. 12 мкН. 20. 4. 21. 7.2 мкН. 22. 0. 23. 0. 24. 0,04 с/м.  
25. 10000 м/с. 26. 5000 м/с<sup>2</sup>. 27. 0,01 м. 28. 4. 29. 0.01 м. 30. 2. 31. 2.  
32. 0,6 Вб. 33. 0.6 Вб. 34. 12,5 мВб. 35. 3,14 В. 36. 3 В. 37. 785 мкВ.  
38. 3,14 Кл. 39. 0,5 В. 40. 100. 41. 10 м/с. 42. 1 Тл. 43. 0,5 В. 44. 0,04 В.  
45. 4 Н. 46. 4 Дж. 47. 13 мГн. 48. 0,28 В. 49. 0,45 с. 50. 4 Дж. 51. 9,3 В.  
52. 0,1 В. 53. 1,5. 54. 0,5 В. 55. 1,25 Дж. 56. 1 А. 57. 0,03 Тл. 58. 1,5 Дж.  
59. 1,25. 60. 25 об/с. 61. 282 мА. 62. 2000. 63. 1100 В. 64. 1000 с<sup>-2</sup>.  
65. 1000 Ом. 66. 0,05 Гн. 67. 250 Гц. 68. 0,8. 69. 1100 Дж. 70. 95. 71. 16 В.  
72. 10. 73. 90 %. 74. 1,2 Ом.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ЭЛЕКТРОСТАТИКА.....	3
1.1. Основные понятия и характеристики.....	3
1.2. Свойства электростатических полей.....	4
1.3. Законы электростатики.....	6
1.4. Основные формулы.....	6
1.5. Емкость (емкость). Конденсаторы.....	9
1.6. Методические указания.....	11
1.7. Примеры решения задач.....	12
1.8. Задачи для самостоятельного решения.....	15
2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК.....	20
2.1. Основные понятия и характеристики.....	20
2.2. Основные законы и формулы.....	22
2.3. Проводники второго рода (электролиты).....	25
2.4. Методические указания.....	25
2.5. Примеры решения задач.....	26
2.6. Задачи для самостоятельного решения.....	28
3. МАГНЕТИЗМ.....	32
3.1. Основные характеристики и формулы.....	32
3.2. Явление электромагнитной индукции.....	33
3.3. Переменный ток.....	35
3.4. Методические указания.....	35
3.5. Примеры решения задач.....	36
3.6. Задачи для самостоятельного решения.....	38
ОТВЕТЫ.....	45

*Учебное издание*

**Смирнова Галина Федоровна**

## **ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ**

Методическое пособие по физике  
для абитуриентов

Редактор Н. В. Гриневич  
Корректор Е. Н. Батурчик

---

Подписано в печать 15.09.2011.  
Гарнитура «Таймс».  
Уч.-изд. л. 2,5.

Формат 60x84 1/16.  
Отпечатано на ризографе.  
Тираж 100 экз.

Бумага офсетная.  
Усл. печ. л. 2,91.  
Заказ 218.

---

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.  
220013, Минск, П. Бровки, 6