

Кравченко Игорь Игоревич
Кравченко Ивета Николаевна

**Физика для всех:
Электродинамика**

*Электронный иллюстрированный справочник
по физике*

Оглавление

1 Электростатика	4
1 Заряженные частицы и тела	5
2 Заряд	6
3 Электризация	7
4 Электроскоп. Закон сохранения заряда	8
5 Закон Кулона. Электрическое поле	9
6 Напряженность электрического поля	10
7 Линии электрического поля	11
8 Потенциал	12
9 Эквипотенциальные поверхности	13
10 Сложение электрических полей	14
11 Проводник	15
12 Проводник в электрическом поле	16
13 Электрическое поле проводящего шара	17
14 Диэлектрик	18
15 Конденсатор	19
16 Соединения конденсаторов	20
2 Постоянный ток	21
17 Электрический ток	22
18 Сопротивление	23
19 Закон Ома	24
20 Соединения проводников	25
21 Работа тока. Закон Джоуля—Ленца	26
22 Источник тока	27
23 Закон Ома для полной цепи	28
24 Полупроводник	29
25 Полупроводники <i>p</i> - и <i>n</i> -типа	30
26 <i>p</i> — <i>n</i> -Переход	31
3 Магнитное поле	32
27 Магнит. Магнитное поле	33
28 Магнитная стрелка	34
29 Индукция и линии магнитного поля	35
30 Сложение магнитных полей	36
31 Опыт Эрстеда	37
32 Магнитное поле прямого провода с током	38
33 Магнитное поле кольца с током	39

34	Магнитное поле катушки с током	40
35	Сила Ампера	41
36	Сила Лоренца	42
4	Электромагнитная индукция	43
37	Магнитный поток	44
38	Закон электромагнитной индукции Фарадея	45
39	ЭДС индукции в движущемся проводе	46
40	Правило Ленца	47
41	Индуктивность. Самоиндукция	48
5	Электромагнитные колебания и волны	49
42	Электромагнитные колебания	50
43	Свободные колебания в контуре	51
44	Вынужденные колебания в контуре	52
45	Электроэнергия	53
46	Электромагнитная волна	54

Глава 1

Электростатика

1 Заряженные частицы и тела

Некоторые явления можно объяснить только взаимодействием особого типа — *электромагнитным взаимодействием*. Один из примеров — «прилипание» мелкого листка бумаги к пластиковому предмету, натертому до этого о шерсть.

Стали считать, что подобные явления (*электрические явления*) возможны благодаря наличию в телах так называемых *заряженных частиц* — частиц, обладающих способностью к электромагнитному взаимодействию (вводят два вида таких частиц: *положительные* и *отрицательные*). Частицы, не имеющие такую способность, называют *незаряженными* или *нейтральными*.

Ключевую роль при объяснении электрических явлений играет строение атома. На рис. 1 показана *планетарная модель атома*.

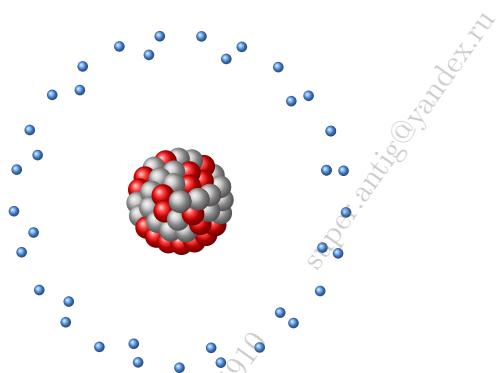


Рис. 1. Модель атома

Любой атом состоит из следующих частиц.

1. **Ядро** — это сложная частица, находящаяся в центре атома¹ и несущая почти всю его массу (группа из красных и серых шаров на рис. 1). В общем случае ядро является образованием из нескольких частиц — протонов и нейтронов. **Протоны** (*p*) — это *положительно заряженные* частицы (красные шары на рис. 1); **нейтроны** (*n*) — это нейтральные частицы (серые шары на рис. 1).

Наличие протонов в ядре делает его положительно заряженной частицей.

2. **Электроны** (*e*) — это *отрицательно заряженные* частицы (синие шары на рис. 1). Они движутся вокруг ядра.

Таким образом, любое тело несет в себе положительно (протоны) и отрицательно (электроны) заряженные частицы. Протоны, нейтроны и электроны называют *элементарными частицами*. Атом в целом электронейтрален: в нем количество положительно заряженных протонов *равно* количеству отрицательно заряженных электронов.

Электрические явления вызываются, как говорят, заряженными телами. **Заряженное тело** — это тело, в котором количество протонов *не равно* количеству электронов. Например, если в теле протонов больше, чем электронов, то тело считается положительно заряженным: знак «заряженности» тела определяется знаком тех частиц, которые преобладают в нем.

¹На рисунке размер ядра преувеличен: ядро занимает чрезвычайно малую часть атома.

2 Заряд

Заряженные тела могут как притягиваться друг к другу, так и отталкиваться. В общем случае характер взаимодействия таких тел определяется их зарядами.

Заряд (q [Кл]) — это характеристика способности заряженного тела взаимодействовать с другим заряженным телом. Чем больше заряд данного тела, тем с большей силой это тело притягивается (или отталкивается) к другому заряженному телу при прочих равных условиях. Положительно заряженное тело имеет положительный заряд, отрицательно заряженное — отрицательный заряд. Для краткости всякое заряженное тело или частицу называют просто зарядом.

На рис. 1 показаны два заряженных тела.

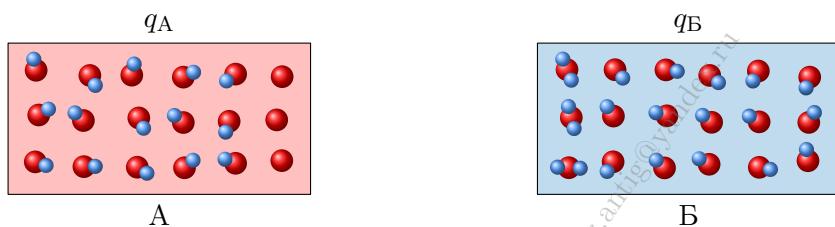


Рис. 1. Заряженные тела

Каждое тело на рис. 1 упрощенно составлено из протонов (красные шары) и электронов (синие шары)¹. Тело А имеет положительный заряд $q_A > 0$: в нем протоны преобладают над электронами. Наоборот, тело Б несет отрицательный заряд $q_B < 0$: в нем уже электроны преобладают над протонами.

Заряды (заряженные тела) разных знаков притягиваются друг к другу, а заряды одного знака друг от друга отталкиваются. Сказанное иллюстрируется рисунком 2 (красным шаром на нитях сообщены положительные заряды, синим — отрицательные).

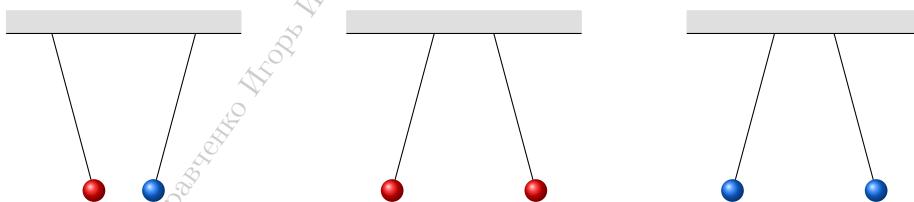


Рис. 2. Притяжение и отталкивание зарядов

Элементарный электрический заряд (e [Кл]) — это величина наименьшего заряда, существующего в природе ($e \approx 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл). Протон и электрон являются частицами с минимальной возможной величиной заряда. Заряд протона равен $q_p \approx 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл; заряд электрона равен $q_e \approx -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, то есть его заряд равен заряду протона со знаком минус.

Заряд тела обусловлен преобладанием в нем протонов или электронов. Если заряд тела $q > 0$, то $q = Nq_p$ (где N — количество избыточных протонов). Если заряд тела $q < 0$, то $q = Nq_e$ (где N — количество избыточных электронов).

¹Внимание уделено именно заряженным частицам, находящимся в атомах тела. Разница в размерах шаров на рисунке 1 подчеркивает различие масс соответствующих частиц: масса протона почти в 2000 раз больше массы электрона.

3 Электризация

Электризация — это процесс, в результате которого тело (часть тела) переходит из незаряженного состояния в заряженное. Можно выделить два вида электризации.

- При электризации **трением** тела приобретают заряды вследствие их трения друг о друга.

Пусть имеется два тела — незаряженные куски пластика П и шерсти Ш (рис. 1, слева).

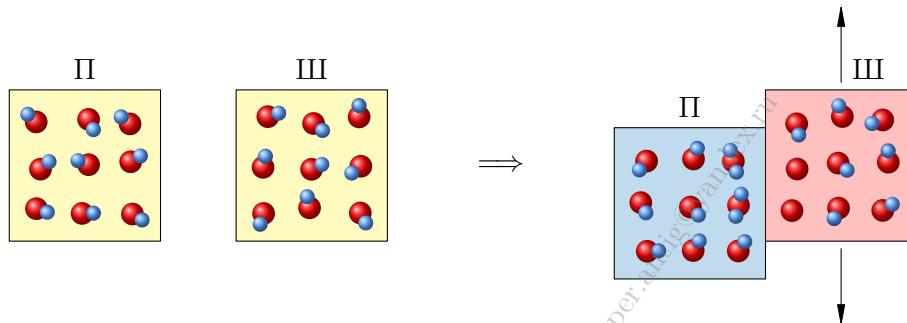


Рис. 1. Электризация трением

Тела П и Ш трут друг о друга (рис. 1, справа). В этом случае некоторые **электроны** (синие шары), находящиеся в контактирующих слоях атомов и сравнительно слабо связанные с ядрами (красные шары) «своего» тела, переходят к ядрам другого тела — электроны стремятся к тем ядрам, с которыми они сильнее связаны. После разведения тела оказываются заряженными: тело П, получившее электроны от тела Ш, несет отрицательный заряд; тело Ш, соответственно, имеет положительный заряд.

- При электризации **влиянием** части тела заряжаются вследствие перераспределения заряженных частиц внутри тела под действием другого тела.

Пусть имеется одно незаряженное металлическое тело М (рис. 2, слева).

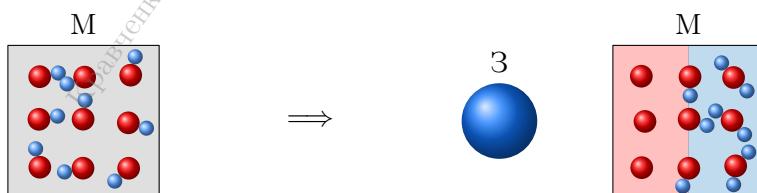


Рис. 2. Электризация влиянием

К телу М подносят слева (не касаясь!), к примеру, отрицательно заряженный шар З и устанавливают его некотором расстоянии от тела М (рис. 2, справа). Шар З отталкивает от себя *свободные* электроны (синие шары) тела М (часть электронов в металле являются свободными — то есть передвигающимися по всему объему тела подобно частицам газа в сосуде). В результате в левой части тела М протоны преобладают над электронами — левая часть тела заряжена положительно. Соответственно, правая часть этого тела от избытка электронов заряжена отрицательно.

4 Электроскоп. Закон сохранения заряда

Электроскоп — это прибор для обнаружения электрических зарядов (рис. 1). Он состоит из металлического *стержня*, пропущенного через пластиковую крышку, закрывающую прозрачный сосуд. К стержню в верхней части обычно припаян металлический *шар*; к нижней части стержня подвешены две подвижные тонкие *пластины* (так называемые листки или лепестки; их делают из металла или бумаги).

Если к незаряженному электроскопу поднести (не касаясь!), например, положительно заряженную палочку (рис. 2, слева), то в следствие электризации *влиянием* в шаре электроны будут преобладать над протонами — верхняя часть прибора заряжена отрицательно. В пластинах тогда будет иметься избыток протонов — нижняя часть прибора заряжена положительно. Так как оба листка поэтому заряжены положительно, то они, отталкиваясь, расходятся в разные стороны. Аналогично, при поднесении без касания отрицательного заряда к электроскопу (рис. 2, справа) его листки тоже расходятся — листки тогда несут отрицательные заряды.

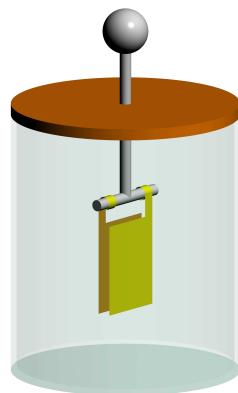


Рис. 1.
Электроскоп

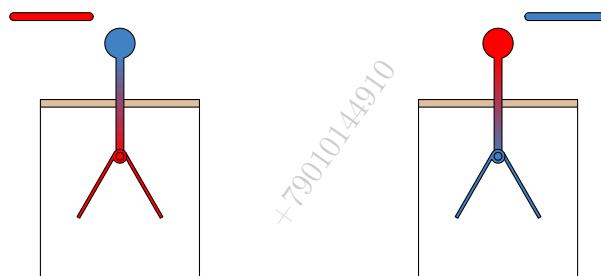


Рис. 2. Опыты с электроскопом

Пусть теперь имеются два заряженных металлических шара (рис. 3, слева).

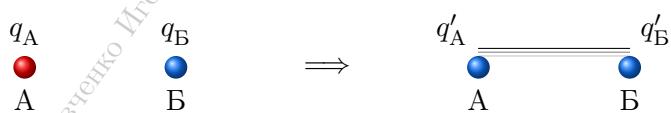


Рис. 3. Опыт с заряженными шарами

Одинаковые шары А и Б (*замкнутая система тел*¹) с зарядами q_A и q_B соединяют тонким железным стержнем, который затем убирают (рис. 3, справа). Теперь шары несут заряды q'_A и q'_B . Здесь выполняется следующий закон.

Закон сохранения заряда. Заряд замкнутой системы тел (сумма зарядов тел системы) остается постоянным при любых процессах, происходящих в системе:

$$q_{\text{до}} = q_{\text{после}}, \quad (1)$$

где $q_{\text{до}}$ и $q_{\text{после}}$ — заряды системы тел до и после рассматриваемого процесса.

Так, для опыта с шарами (рис. 3) формулу (1) можно переписать следующим образом: $q_A + q_B = q'_A + q'_B$ (причем $q'_A = q'_B$, так как шары одинаковые).

¹В замкнутой системе тела могут обмениваться зарядами только между собой.

5 Закон Кулона. Электрическое поле

Закон Кулона. Два тела с зарядами q_1 и q_2 , расположенные в вакууме на расстоянии r , взаимодействуют друг с другом с **силой Кулона**

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

где k — коэффициент пропорциональности (см. справочные таблицы).

На рис. 1 изображены два отрицательных заряда.

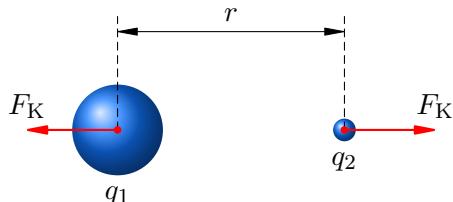


Рис. 1. Взаимодействие двух отрицательных зарядов

Заряды q_1 и q_2 расположены на некотором расстоянии r друг от друга¹. Как и любые два заряженных тела, эти заряды *взаимодействуют* друг с другом. В данном случае заряд q_1 отталкивается от заряда q_2 с силой F_K , а заряд q_2 — от заряда q_1 с такой же силой F_K .

Сила Кулона зависит от среды, в которой находятся заряды. Часто заряды оказываются помещенными в так называемый *диэлектрик* — вещество, которое не проводят через себя электрические заряды (например, если соединить диэлектриком² два металлических шара, несущих разноименные заряды, то перераспределения зарядов между шарами не будет). В диэлектрике формула (1) приобретает вид:

$$F_K = k \frac{q_1 q_2}{\varepsilon r^2},$$

где ε — *диэлектрическая проницаемость* среды (см. справочные таблицы).

Считают, что взаимодействие неподвижных зарядов осуществляется посредством *электрического поля* — формы материи, окружающей заряженные тела (поле можно представлять себе как невидимое истечение из тела воображаемой жидкости и т. п.). Сказанное проиллюстрировано на рис. 2: поле положительно-го заряда А «отталкивает» положительный заряд Б от заряда А (и наоборот)³.

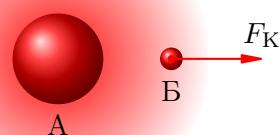


Рис. 2. Действие поля одного заряда на другой

¹Для однородно заряженных шарообразных тел r есть расстояние между их центрами.

²Примерами диэлектриков являются пластик, стекло, масло и т. д.

³Скорость передачи взаимодействия между зарядами равна примерно $3 \cdot 10^8$ м/с.

6 Напряженность электрического поля

Любое заряженное тело порождает электрическое поле в пространстве вокруг себя. Во всякой точке этого пространства поле способно вызвать силу, действующую на точечный заряд¹, помещенный в эту точку. (Далее заряды предполагаются точечными, если не оговорено иное.)

Напряженность $\left(\vec{E} \left[\frac{\text{В}}{\text{м}} \right] \right)$ — это характеристика силовой способности электрического поля в точке пространства:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_K}{q_{\text{внесен}}}, \quad (1)$$

где $q_{\text{внесен}}$ — заряд, *внесенный (помещенный) в поле* (на него действует поле).

В каждой точке пространства поле характеризуется вектором напряженности \vec{E} . Вектор \vec{E} всегда указывает направление силы Кулона, которая бы действовала на *положительный* заряд, помещенный в соответствующую точку.

На рис. 1 показан вектор напряженности \vec{E} поля, создаваемого положительным зарядом, в произвольной точке на расстоянии r от него.

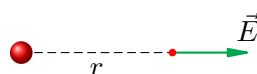


Рис. 1. Напряженность поля положительного заряда

Как видно из рисунка, напряженность поля положительного заряда направлена *от него*. Напряженность же поля, создаваемого отрицательным зарядом, в произвольной точке направлена *к нему*.

Напряженность поля точечного заряда в вакууме находят так (подстановка формулы закона Кулона в формулу (1)):

$$E = k \frac{q_{\text{источника}}}{r^2}, \quad (2)$$

где $q_{\text{источника}}$ — заряд тела, создающего поле.

Особый интерес представляет поле вблизи *заряженной пластины* (*заряженной плоскости*) с равномерным распределением заряда по ее поверхности. В этом случае пластина создает *однородное поле* — *поле, напряженность которого одинакова в каждой точке рассматриваемой области* ($\vec{E} = \text{const}$).

Заряженную пластину характеризуют *поверхностной плотностью заряда*:

$$\sigma = \frac{q}{S}, \quad (3)$$

где q — заряд участка пластины площадью S .

Напряженность поля пластины в вакууме тогда находят по формуле:

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}, \quad (4)$$

где ϵ_0 — *электрическая постоянная* (см. справочные таблицы).

Для среды с диэлектрической проницаемостью ϵ формулы (2) и (4) переписываются так:

$$E = k \frac{q_{\text{источника}}}{\epsilon r^2}, \quad E = \frac{\sigma}{2\epsilon\epsilon_0}.$$

¹Точечный заряд — это заряженное тело, размерами которого можно пренебречь.

7 Линии электрического поля

Наглядно описывать электрическое поле в пространстве принято с помощью **линий электрического поля** — линий, идущих вдоль векторов напряженности поля в различных точках пространства¹.

На рис. 1 показаны картины линий поля *точечного заряда* для двух случаев: положительный и отрицательный заряд.

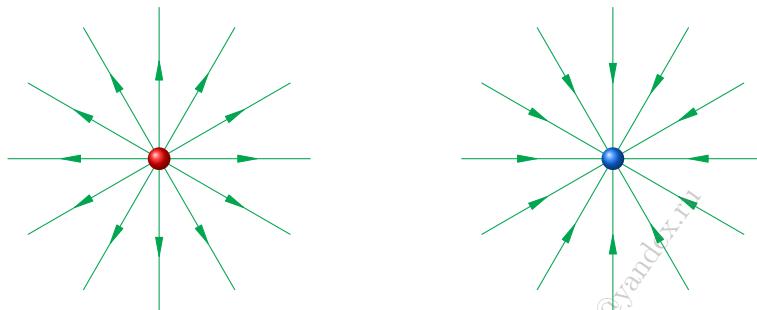


Рис. 1. Линии электрического поля точечного заряда

Линии поля положительного заряда *выходят из него* (рис. 1, слева); наоборот, линии поля отрицательного заряда *входят в него* (рис. 1, справа).

Линии поля *указывают направления векторов напряженности в пространстве*. Чем больше густота линий, тем больше напряженность в данной области пространства.

На рис. 2 показаны картины линий поля вблизи равномерно *заряженной пластины* в двух случаях: положительно и отрицательно заряженная пластина.

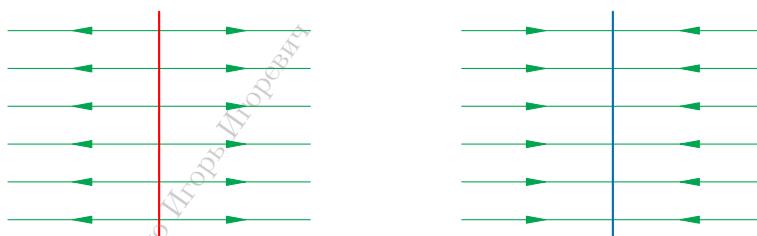


Рис. 2. Линии электрического поля заряженной пластины

Возле каждой из пластин на рис. 2 поле является *однородным*. Из этого рисунка видно, что линии однородного поля являются *параллельными прямыми одинаковой густоты*.

Линии поля не пересекаются, они всегда начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных.

Задача. Как меняется напряженность поля с удалением от точечного заряда?

Решение. С увеличением расстояния от заряда, создающего поле, густота линий поля уменьшается (см. рис. 1); значит, с удалением от заряда напряженность уменьшается.

¹Эти линии называют также *линиями напряженности* или *силовыми линиями*. Всякая линия поля изображается так, что в любой ее точке вектор напряженности направлен по касательной к линии поля.

8 Потенциал

В общем случае электрическое поле¹ способно разгонять заряд, помещенный в него, — говорят, что заряд в таком поле имеет потенциальную энергию.

Пусть заряд находится в однородном поле (рис. 1).

Положительный заряд вначале покоятся и взаимодействует только с электрическим полем. Ясно, что заряд будет «падать» под действием этого поля вдоль его линий на воображаемую поверхность Π (поле может быть направлено в любую сторону, поэтому «падать» заряд может также в любую сторону). Тогда говорят, что заряд q , находящийся в однородном электрическом поле E и способный «упасть» с высоты h под действием этого поля, обладает **потенциальной энергией** (обусловленной взаимодействием заряда с полем):

$$W = qEh. \quad (1)$$

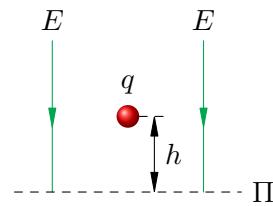


Рис. 1. Заряд в однородном поле

Случай заряда в однородном электрическом поле напоминает ситуацию с телом, поднятым над поверхностью планеты. Как известно, потенциальная энергия тела, обусловленная притяжением тела и планеты, равна $E_p = mgh$. Таким образом, в формуле (1) заряд q является аналогом массы m , а напряженность E является аналогом ускорения свободного падения g .

Потенциал (φ [В]) — это энергетическая характеристика электрического поля в точке пространства:

$$\varphi = \frac{W}{q_{\text{внесен}}}, \quad (2)$$

где W — потенциальная энергия заряда $q_{\text{внесен}}$ в электрическом поле.

Потенциал поля точечного заряда в вакууме находят по формуле:

$$\varphi = k \frac{q_{\text{источника}}}{r}, \quad (3)$$

где r — расстояние от заряда $q_{\text{источника}}$ до рассматриваемой точки.

В диэлектрике формула (3) приобретает вид: $\varphi = k \frac{q_{\text{источника}}}{\epsilon r}$.

Если заряд перемещается в поле из точки 1 в точку 2, то полезно ввести следующую величину. **Напряжение (U [В])** — это разность потенциалов:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q_{\text{внесен}}}, \quad (4)$$

где φ_1 и φ_2 — потенциалы поля в начальной и конечной точке траектории, A — работа силы поля, действующей на перемещающийся заряд $q_{\text{внесен}}$ ($A = -\Delta W$).

Важно подчеркнуть, что разность потенциалов есть потенциал начальной точки минус потенциал конечной точки.

Следует отметить, что вектор напряженности поля указывает направление убывания потенциала. Так, на рис. 1 в точке нахождения заряда q потенциал поля больше, чем потенциал точки поверхности Π под зарядом.

Напряжение в однородном поле равно:

$$U = Ed, \quad (5)$$

где d — расстояние между двумя точками вдоль линии поля.

¹Электрическое поле далее предполагается *постоянным* — то есть *электростатическим*.

9 Эквипотенциальные поверхности

Характеризовать распределение поля в пространстве можно с помощью так называемых эквипотенциальных поверхностей.

Эквипотенциальная поверхность — это поверхность в пространстве, все точки которой имеют *одинаковый потенциал* ($\varphi = \text{const}$).

На рис. 1 изображены эквипотенциальные поверхности поля для двух случаев: точечный заряд и заряженная пластина.



Рис. 1. Эквипотенциальные поверхности поля заряженного тела

Эквипотенциальными поверхностями поля точечного заряда являются все возможные сферы с центром в заряде (серые линии на рис. 1, слева). Поле же вблизи равномерно заряженной пластины описывается эквипотенциальными поверхностями, параллельными пластине (серые линии на рис. 1, справа).

Эквипотенциальные поверхности всегда *перпендикулярны линиям поля*. Этот факт иллюстрируется рисунком 2.

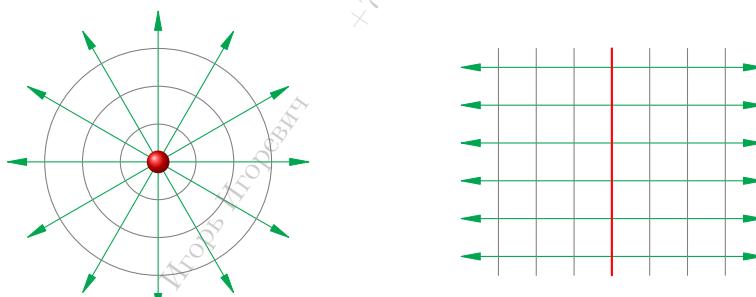


Рис. 2. Перпендикулярность эквипотенциальных поверхностей и линий поля

Задача. На рис. 3 показаны линии однородного электрического поля и две эквипотенциальные поверхности (A и B). Какая поверхность, A или B, характеризуется большим значением потенциала?

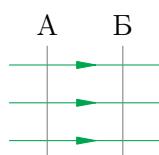


Рис. 3. К задаче

Решение. Как известно, в направлении линии поля потенциал поля убывает. Значит, потенциал поверхности A больше потенциала поверхности B.

10 Сложение электрических полей

Электрическое поле, создаваемое несколькими зарядами, можно рассматривать как наложение полей, создаваемых каждым зарядом в отдельности.

Принцип суперпозиции для напряженностей. Если заряды q_1, q_2, \dots по отдельности создают в данной точке поля $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \dots$, то вместе они создают в данной точке поле

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots \quad (1)$$

Этот принцип можно проиллюстрировать для случая двух зарядов (рис. 1).

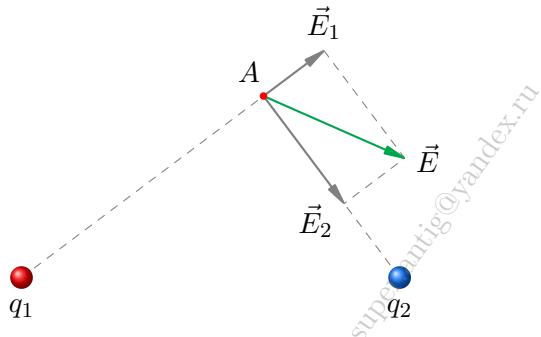


Рис. 1. Принцип суперпозиции для напряженностей

Положительный заряд q_1 создает в точке A поле \vec{E}_1 , а отрицательный заряд q_2 в этой же точке создает поле \vec{E}_2 . Согласно вышеуказанному принципу вместе они создают в точке A поле $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ (рис. 1).

Напряженности полей в общем случае складываются векторно.

Принцип суперпозиции для потенциалов. Если заряды q_1, q_2, \dots по отдельности создают поля с потенциалами $\varphi_1, \varphi_2, \dots$ в данной точке, то вместе они создают поле, потенциал которого в данной точке равен

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots \quad (2)$$

Пусть снова имеется система двух зарядов (рис. 2).

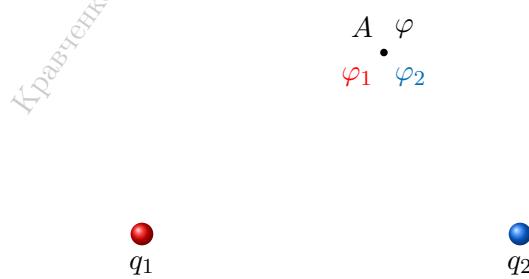


Рис. 2. Принцип суперпозиции для потенциалов

Положительный заряд q_1 создает поле с потенциалом φ_1 в точке A , а отрицательный заряд q_2 — поле с потенциалом φ_2 в этой же точке. Тогда вместе они создают поле, потенциал которого в точке A равен $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$ (рис. 2).

Следует отметить, что потенциалу поля положительного заряда приписывают знак плюс, потенциалу поля отрицательного заряда — знак минус. Так, в ситуации на рис. 2 это правило дает: $\varphi_1 > 0$ и $\varphi_2 < 0$.

11 Проводник

Проводник — это тело, способное проводить через себя электрические заряды. Например, если соединить проводником металлическое *заряженное* тело А и металлическое *незаряженное* тело Б, то заряд тела А перераспределится между этими двумя телами.

Проводники характеризуются наличием *свободных зарядов* — заряженных частиц, способных перемещаться по всему объему тела (эти частицы не имеют постоянного места пребывания в теле).

Выделяют два основных вида проводников.

1. В **металле** свободными зарядами являются *свободные электроны*. Эти электроны слабо связаны с атомами вещества и «путешествуют» по всему пространству металла (рис. 1).

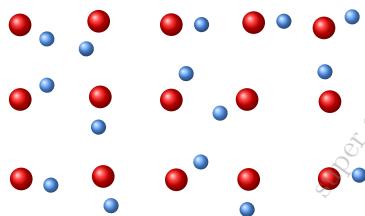


Рис. 1. Модель металла

Свободные электроны (синие шары), отделившись от своих атомов (красные шары), «летают» между ними по всему металлу. Говорят, что свободные электроны образуют *электронный газ*.

Строго говоря, свободные электроны в металле двигаются между ионами. *Ион* — это заряженная частица, в которую превратился атом (группа атомов), отдавший или получивший электрон (или несколько электронов). Ион, в котором протоны преобладают над электронами, называют *катионом* (он заряжен положительно); ион, в котором имеется избыточное количество электронов, называют *анионом* (он несет отрицательный заряд).

2. В **электролите** свободными зарядами являются ионы. Электролитами обычно называют растворы (или расплавы) солей, кислот и оснований. В таких растворах «свободно плавают» ионы (рис. 2).

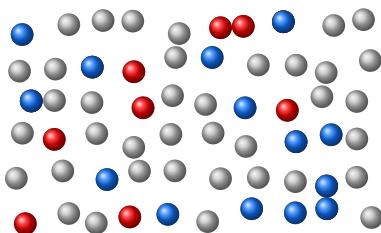


Рис. 2. Модель электролита (раствор)

Например, соль NaCl в воде распадается на положительные ионы Na^+ (красные шары) и отрицательные ионы Cl^- (синие шары), беспорядочно двигающиеся в растворе наряду с молекулами воды H_2O (серые шары).

12 Проводник в электрическом поле

Проводники (заряженные или незаряженные), помещенные в постоянное электрическое поле (электростатическое поле), обладают рядом общих свойств.

1. *Напряженность поля внутри проводника везде равна нулю.*

Пусть незаряженный железный куб помещен в однородное поле (рис. 1).

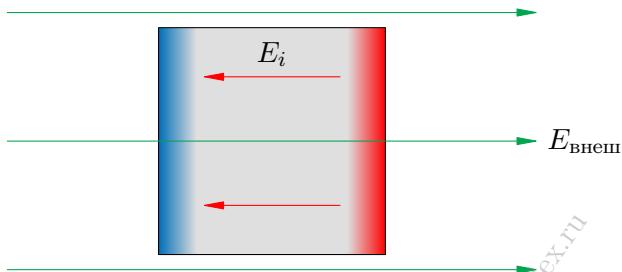


Рис. 1. Проводник в электрическом поле

Действие внешнего поля $E_{\text{внеш}}$ ведет к избытку свободных электронов в левой части куба. На левой поверхности куба *наводятся (индуктируются)* избыточные отрицательные заряды (синяя область); на правой поверхности куба тогда имеются избыточные положительные заряды (красная область). Наведенные на поверхностях проводника заряды создают собственное поле E_i , направленное против внешнего поля $E_{\text{внеш}}$ (рис. 1).

Во всей области внутри куба поле E_i полностью компенсирует внешнее поле $E_{\text{внеш}}$: результирующее (суммарное) поле E внутри проводника оказывается равным $E = E_{\text{внеш}} - E_i = 0$.

2. *Избыточные заряды проводника располагаются лишь на его поверхности. Заряд любой области внутри проводника равен нулю.*
3. *Линии электрического поля входят в проводник (или выходят из него) перпендикулярно его поверхности.*

На рис. 2 показана примерная картина линий результирующего поля для рассмотренного примера с проводящим кубом.

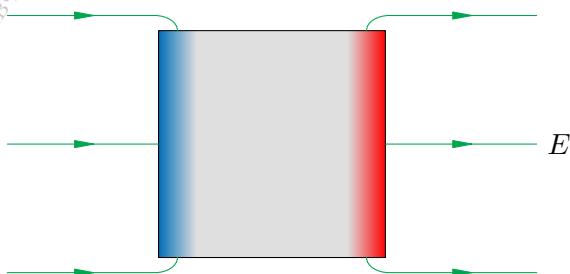


Рис. 2. Линии поля вокруг проводника

Из рисунка 2 видно, что любая линия поля вблизи куба направлена точно под прямым углом к его поверхности.

4. *Все точки проводника имеют одинаковый потенциал.*

Итак, между любыми двумя точками проводника напряжение равно нулю.

13 Электрическое поле проводящего шара

Пусть имеется металлический заряженный шар (сфера) в вакууме (рис. 1).

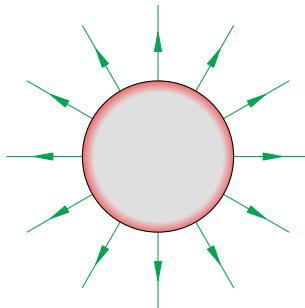


Рис. 1. Линии поля положительно заряженного шара

Шар радиуса R имеет заряд q . Интерес представляют напряженность и потенциал поля в любой точке пространства на расстоянии r от центра шара.

- **Напряженность.** Внутри шара напряженность поля равна нулю (линии поля в шаре отсутствуют — см. рис. 1):

$$E = 0, \quad \text{если } r < R. \quad (1)$$

Вне шара напряженность оказывается такой же, как если бы заряд шара был сосредоточен в его центре:

$$E = k \frac{q}{r^2}, \quad \text{если } r > R. \quad (2)$$

- **Потенциал.** Внутри шара потенциал везде одинаков и равен потенциалу точек поверхности шара:

$$\varphi = k \frac{q}{R}, \quad \text{если } r < R. \quad (3)$$

Потенциал поля вне шара равен потенциалу поля заряда шара, сосредоточенного в его центре:

$$\varphi = k \frac{q}{r}, \quad \text{если } r > R. \quad (4)$$

На рис. 2 показаны графики зависимостей напряженности и потенциала поля рассмотренного шара от расстояния до его центра.

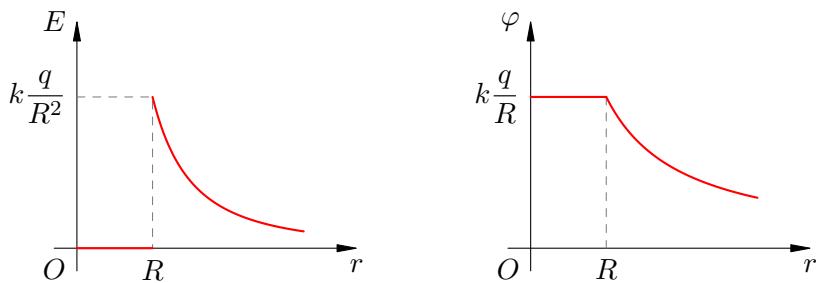


Рис. 2. Напряженность и потенциал поля заряженного шара

Если поле шара создается в диэлектрике, то в формулах (2)–(4) знаменатель домножается на величину ϵ (диэлектрическая проницаемость).

14 Диэлектрик

Диэлектрик — это тело, *не* способное проводить через себя электрические заряды. Например, если металлическое *заряженное* тело А соединить диэлектриком с металлическим *незаряженным* телом Б, то заряд тела А *не* перераспределится между этими двумя телами.

В диэлектрике (в отличие от проводника) *нет свободных зарядов*. Заряженные частицы (электроны и ядра) в диэлектрике являются *связанными* — электроны в таком случае могут перемещаться лишь внутри молекулы тела (рис. 1).

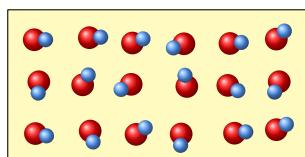


Рис. 1. Диэлектрик

Соответствующие электроны (синие шары) и ядра (красные шары) сцеплены друг с другом (если диэлектрик жидкий или газообразный, то его молекулы «носят с собой» свои ядра и электроны)¹.

Пусть диэлектрик помещен в однородное электрическое поле (рис. 2).

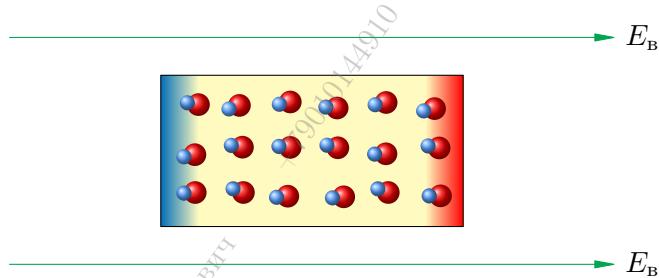


Рис. 2. Диэлектрик в электрическом поле

Внешнее поле E_B «разворачивает» молекулы диэлектрика так, что на одной поверхности тела (левая поверхность — синяя область) оказываются преимущественно отрицательные заряды — электроны, а на другой поверхности (правая поверхность — красная область) оказываются в основном положительные заряды — ядра. Это происходит вследствие действия силы Кулона на электроны со стороны поля: на рис. 2 эта сила «тянет» электроны влево.

Избыточные *наведенные* заряды на поверхностях диэлектрика (см. рис. 2) создают внутри тела собственное поле E_i , направленное *против* внешнего поля E_B . Поле E_i ослабляет поле E_B внутри диэлектрика (при этом $E_i < E_B$). Результирующее (суммарное) поле E внутри тела равно $E = E_B - E_i > 0$.

Диэлектрическая проницаемость (ϵ) — это характеристика тела, показывающая во сколько раз уменьшается поле в нем по сравнению с вакуумом:

$$\epsilon = \frac{E_B}{E}, \quad (1)$$

где E_B — поле в вакууме, E — поле в данном теле ($E < E_B$).

¹ В особых случаях электрон может «оторваться» от своего ядра — так происходит, например, при электризации диэлектрика трением.

15 Конденсатор

Конденсатор — это устройство для накопления электрических зарядов. На рис. 1 показана конструкция *плоского конденсатора*.

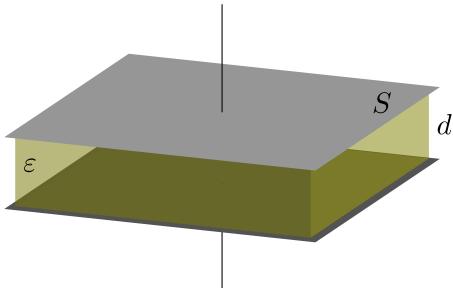


Рис. 1. Плоский конденсатор

Простейший плоский конденсатор состоит из двух параллельных металлических пластин (*обкладки*) площадью S каждая, расположенных на малом расстоянии d друг от друга и разделенных слоем диэлектрика¹ с диэлектрической проницаемостью ϵ . Конденсатор также имеет *выводы* (черные линии на рис. 1) для его соединения с другими устройствами.

Обычно в заряженном конденсаторе (то есть накопившем заряды на своих обкладках) одна из пластин конденсатора несет заряд $+q$, а другая — заряд $-q$. Под *зарядом конденсатора* понимают заряд его *положительной* обкладки.

Емкость (C [Φ]) — это характеристика конденсатора, показывающая его способность накапливать заряд:

$$C = \frac{q}{U}, \quad (1)$$

где q — заряд конденсатора, U — напряжение между пластинами.

Емкость численно равна заряду конденсатора при напряжении 1 В между его обкладками.

Емкость конденсатора зависит от его размеров и диэлектрика в нем:

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}, \quad (2)$$

где ϵ_0 — электрическая постоянная (см. справочные таблицы).

Энергия конденсатора рассчитывается по формуле:

$$W_C = \frac{CU^2}{2}. \quad (3)$$

Задача. Плоский конденсатор состоит из двух параллельно расположенных в воздухе пластинок, каждая площадью 100 см^2 , расстояние между ними $0,2 \text{ см}$. Определите емкость конденсатора.

Решение. Между пластинами воздух: $\epsilon = 1$. Электрическая постоянная $\epsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$. Тогда:

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d} = \frac{1 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 100 \cdot 10^{-4}}{0,2 \cdot 10^{-2}} = 4,425 \cdot 10^{-11} \text{ Ф.}$$

¹Также между обкладками может быть *вакуум* ($\epsilon = 1$). Диэлектрическая проницаемость *воздуха* обычно также считается равной единице.

16 Соединения конденсаторов

Конденсаторы соединяют друг с другом двумя способами.

1. **Последовательное соединение:** конец каждого конденсатора соединяется с началом следующего за ним конденсатора (рис. 1, слева). *Провод¹, соединяющий конец одного конденсатора с началом другого, не соединяется с каким-то еще устройством.*

Вот свойства последовательного соединения.

- Заряд блока конденсаторов² и заряды конденсаторов равны:

$$q = q_1 = q_2 = \dots \quad (1)$$

- Напряжение между концами блока конденсаторов равно сумме напряжений на каждом конденсаторе:

$$U = U_1 + U_2 + \dots \quad (2)$$

- Емкость блока конденсаторов находят из соотношения:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots \quad (3)$$

2. **Параллельное соединение:** начала конденсаторов соединяются между собой, концы конденсаторов соединяются также между собой (рис. 1, справа). *От начала одного из конденсаторов по проводам возможно мысленно перейти к началу любого другого из конденсаторов, не встретив никакое другое устройство* (такие «переходы» также возможны между концами конденсаторов).

Вот свойства параллельного соединения.

- Напряжение блока конденсаторов и их напряжения равны:

$$U = U_1 = U_2 = \dots \quad (4)$$

- Заряд блока конденсаторов равен сумме зарядов на каждом из них:

$$q = q_1 + q_2 + \dots \quad (5)$$

- Емкость блока конденсаторов находят так:

$$C = C_1 + C_2 + \dots \quad (6)$$

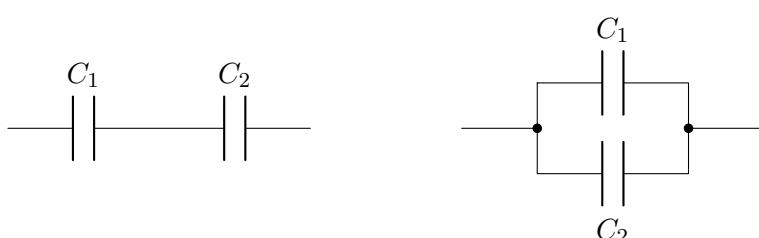


Рис. 1. Последовательное и параллельное соединение двух конденсаторов

¹Провод на электрических схемах изображается просто линией.

²Блок конденсаторов — это группа соединенных между собой конденсаторов (блок имеет два вывода, или конца). Такой блок можно рассматривать как один сложный конденсатор.

Глава 2

Постоянный ток

17 Электрический ток

Электрический ток — это направленное движение заряженных частиц. На рис. 1 изображен ток в теле.

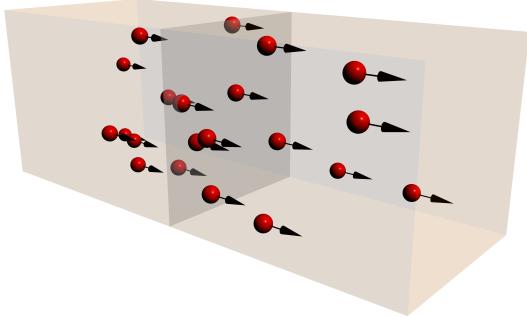


Рис. 1. Электрический ток

Положительные заряды (красные шары) упорядоченно двигаются из одной области тела (светло-оранжевая фигура) в другую. Через *поперечное сечение* (серая плоскость) тела при протекании тока переносится заряд (равный сумме зарядов заряженных частиц, прошедших поперечное сечение за данное время). *Происходит перенос заряда из одной области пространства в другую.*

Сила тока (I [A]) — это характеристика тока, показывающая быстроту¹ переноса заряда:

$$I = \frac{q}{t}, \quad (1)$$

где q — заряд, перенесенный через поперечное сечение за время t .

Ток называют *постоянным*, если его сила тока остается постоянной.

Обычно скорость направленного движения заряженных частиц, образующих ток, сравнительно невелика (доли миллиметра в секунду).

Вот **связь силы тока со скоростью** направленного движения заряженных частиц:

$$I = nevS, \quad (2)$$

где n — концентрация частиц, e — заряд одной частицы, v — скорость направленного движения частиц, S — площадь поперечного сечения.

Для возникновения тока необходимо выполнение следующих условий.

1. *Наличие свободных заряженных частиц.* Среды, содержащие такие частицы, называют *проводниками*.
2. *Наличие электрического поля внутри проводника.* Иначе говоря, между концами проводника нужно обеспечить напряжение.

Если между концами проводника создают *постоянное напряжение*, то в проводнике устанавливается *постоянный ток*. Постоянное напряжение поддерживают с помощью *источника тока* (например, батарейки).

Ток в *металлах* обусловлен движением свободных *электронов*.

¹Более точно, сила тока есть скорость переноса заряда ($I = \Delta q / \Delta t$) или производная заряда по времени ($I = q'$). Важно заметить, что сила тока *не* есть скорость упорядоченного движения самих частиц, образующих ток.

18 Сопротивление

Сопротивление (R [Ом]) — это характеристика проводника, показывающая его способность препятствовать прохождению тока через него. Например, если проводник А подключить к батарейке, а затем (отсоединив проводник А от батарейки) проводник Б подключить к этой же батарейке, то сопротивление будет *больше* у того проводника, в котором *сила тока была меньше*.

Пусть имеются три медных провода (рис. 1).

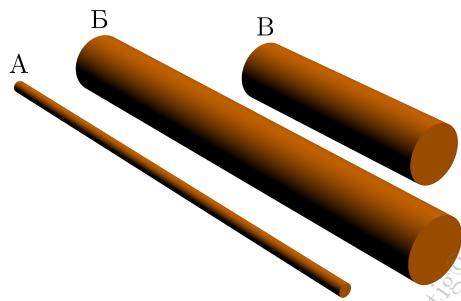


Рис. 1. Три проводника

Провода А, Б и В имеют сопротивления R_A , R_B и R_V . Опыт показывает, что их сопротивления связаны так: $R_A > R_B > R_V$. Сравнивать сопротивления тел из одинакового материала можно, используя следующую аналогию: чем «проще» протечь воображаемой жидкости через тело, представляемое как «труба» (то есть чем шире и короче «труба»), тем меньше сопротивление тела.

Сопротивление проводника вычисляется по формуле:

$$R = \frac{\rho_s l}{S}, \quad (1)$$

где ρ_s — *удельное сопротивление* вещества (см. справочные таблицы), l — длина проводника, S — площадь поперечного сечения проводника¹.

Сопротивление прохождению тока, например, в металлах объясняют тем, что свободные электроны, совершая направленное движение, сталкиваются с ионами металла, колеблющимися вблизи своих положений равновесия (рис. 2).

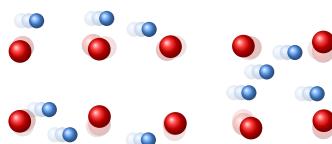


Рис. 2. Направленное движение электронов между ионами металла

Проводник, обладающий сопротивлением, называют *резистором* и изображают на схемах следующим образом (рис. 3).

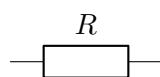


Рис. 3. Резистор

¹Или площадь поперечной грани (торца) тела, из которой предполагается «вытекает» ток.

19 Закон Ома

Закон Ома. Сила тока через проводник¹ прямо пропорциональна напряжению на этом проводнике и обратно пропорциональна его сопротивлению:

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

Разобраться с законом Ома помогает аналогия с жидкостью (рис. 1).

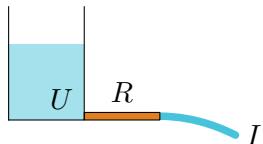


Рис. 1. Аналогия к закону Ома

В сосуде с жидкостью имеется у дна отверстие, в которое вставлена трубка. Давление (аналог напряжения U), создаваемое жидкостью у отверстия, вызывает протекание жидкости по трубке (аналог резистора сопротивлением R). В результате из трубы выливается жидкость с некоторой быстротой вытекания (аналог силы тока I).

Меняя параметры системы на рис. 1, то есть давление (U) у дна и размер отверстия и трубы (R), можно получать различную быстроту вытекания (I) жидкости и убеждаться в справедливости закона Ома.

Закон Ома справедлив для металлов и электролитов. Зависимость силы тока от напряжения (вольт-амперная характеристика или BAX), например, медного провода изображается прямой линией на IU -диаграмме (рис. 2).

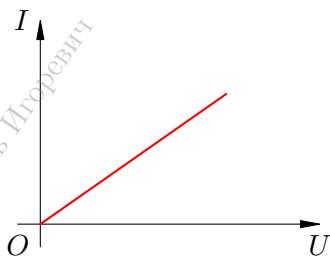


Рис. 2. ВАХ металлического проводника

Задача. Каким должно быть напряжение на концах участка цепи, чтобы сила тока в проводнике равнялась 1 А, если при напряжении 3 В сила тока в этом же проводнике равна 0,5 А.

Решение. Если нет специальных оговорок, то сопротивление R проводника есть величина постоянная. Пусть $U_1 = 3$ В, $I_1 = 0,5$ А и $I_2 = 1$ А. Тогда:

$$R = \frac{U_1}{I_1} = \frac{3}{0,5} = 6 \text{ Ом.}$$

Искомое напряжение равно:

$$U_2 = I_2 R = 1 \cdot 6 = 6 \text{ В.}$$

¹Проводником также считается система соединенных между собой проводников (блок проводников); предполагается, что такой блок, как и один проводник, имеет два вывода (конца).

20 Соединения проводников

Проводники соединяют друг с другом двумя способами.

1. **Последовательное соединение:** конец каждого проводника соединяется с началом следующего за ним проводника (рис. 1, слева). *Провод¹, соединяющий конец одного проводника с началом другого, не соединяется с каким-то еще устройством.*

Вот свойства последовательного соединения.

- Сила тока (кратко — ток) через блок проводников² и токи через проводники равны:

$$I = I_1 = I_2 = \dots \quad (1)$$

- Напряжение между концами блока проводников равно сумме напряжений на каждом проводнике:

$$U = U_1 + U_2 + \dots \quad (2)$$

- Сопротивление блока проводников находят так:

$$R = R_1 + R_2 + \dots \quad (3)$$

2. **Параллельное соединение:** начала проводников соединяются между собой, концы проводников соединяются также между собой (рис. 1, справа). *От начала одного из проводников по проводам возможно мысленно перейти к началу любого другого из проводников, не встретив никакое другое устройство* (такие «переходы» также возможны между концами проводников).

Вот свойства параллельного соединения.

- Напряжение на блоке проводников и напряжения на них равны:

$$U = U_1 = U_2 = \dots \quad (4)$$

- Ток через блок проводников равен сумме токов через каждый из них:

$$I = I_1 + I_2 + \dots \quad (5)$$

- Сопротивление блока проводников находят из соотношения:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots \quad (6)$$

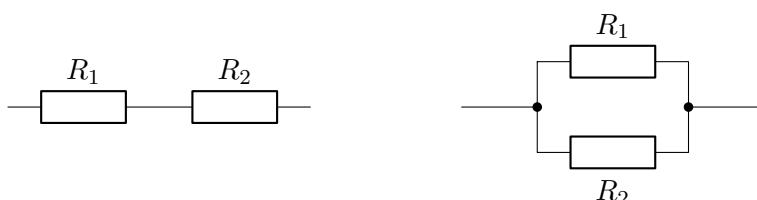


Рис. 1. Последовательное и параллельное соединение двух проводников

¹Провод на электрических схемах изображается просто линией.

²Блок проводников — это группа соединенных между собой проводников (блок имеет два вывода, или конца). Такой блок можно рассматривать как один сложный проводник.

21 Работа тока. Закон Джоуля—Ленца

Электрический ток несет с собой *энергию* (аналогия: поток жидкости, несущий механическую энергию). Эта энергия (*электроэнергия*) возникает за счет работы электрического поля, которое «гонит» заряды тока по проводнику.

Работа тока (A [Дж]) — это работа электрического поля по передвижению зарядов тока в проводнике:

$$A = UIt, \quad (1)$$

где U и I — напряжение и ток проводника, t — время протекания тока.

Мощность тока (P [Вт]) — это быстрота совершения работы тока:

$$P = UI. \quad (2)$$

Электроэнергия, потребленная прибором, может быть рассчитана так:

$$W = Pt. \quad (3)$$

Практически всегда возникает необходимость преобразовать электроэнергию в другой вид энергии. В связи с этим широкое применение нашли следующие устройства.

- Электронагреватель преобразует электроэнергию в теплоту.

КПД электронагревателя равен:

$$\eta = \frac{Q_{\text{п}}}{W_3}, \quad (4)$$

где $Q_{\text{п}}$ — полезное тепло, W_3 — затраченная электроэнергия.

- Электродвигатель преобразует электроэнергию в работу.

КПД электродвигателя равен:

$$\eta = \frac{A_{\text{п}}}{W_3}, \quad (5)$$

где $A_{\text{п}}$ — полезная работа, W_3 — затраченная электроэнергия.

Пусть к батарейке подключен стальной провод (рис. 1).

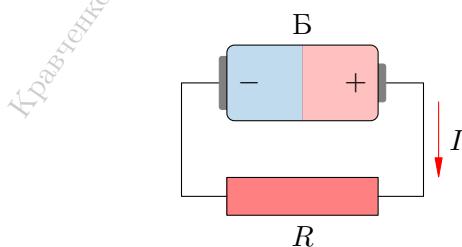


Рис. 1. Опыт с батарейкой и проводом

Батарейка Б вызывает протекание тока¹ I в проводе с сопротивлением R . Опыт показывает, что за время t провод нагреется — в нем выделится тепло, которое можно вычислить по **закону Джоуля—Ленца**:

$$Q = I^2Rt. \quad (6)$$

¹Направлением тока принято считать направление движения *положительных* зарядов (в данном случае они как бы вытекают из «плюса» батарейки и втекают в ее «минус».)

22 Источник тока

Как известно, для того, чтобы через проводник (резистор) протекал ток, к нему (к его концам) нужно, как говорят, приложить напряжение. Напряжение к резистору подводят от *источника тока* (далее для краткости — источник).

В опытах в качестве источника часто используют батарейку (рис. 1, слева).

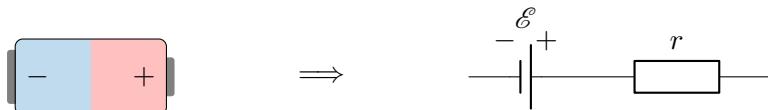


Рис. 1. Источник тока

Любой источник имеет две важные характеристики.

- **Внутреннее сопротивление (r [Ом])** — это сопротивление току, оказываемое со стороны источника.

Внутреннее сопротивление источника обусловлено наличием в нем проводящих частей, по которым он «перекачивает» ток через себя.

- **ЭДС (электродвижущая сила) (\mathcal{E} [В])** — это характеристика источника, показывающая его способность вызывать ток:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ист}}}{q}, \quad (1)$$

где $A_{\text{ист}}$ — *работа источника* (работа *сторонней силы*), q — заряд, перемещенный через источник.

Чем *больше* ЭДС источника, тем *больший* ток (силу тока) он может вызвать в данном проводнике при прочих равных условиях.

Сторонней силой называют силу, «протаскивающую» заряды тока внутри источника (она имеет *неэлектрическое* происхождение).

Обозначение источника на электрической схеме показано на рис. 1 (справа). Из рисунка видно, что *реальный источник* — это как бы блок, состоящий из двух элементов — ЭДС и внутреннего сопротивления (эти элементы нельзя отделить друг от друга).

Источник тока называют также *источником ЭДС*. Источник с пренебрежимо малым внутренним сопротивлением ($r \rightarrow 0$) называют *идеальным*.

Знаками «+» и «-» на рис. 1 обозначаются заряженные части источника (ЭДС): на одном *выводе* (конце) находится избыток положительных зарядов, на другом — избыток отрицательных.

Важно обратить внимание на то, что расположения знаков у батарейки и ее ЭДС всегда *согласованы*: например, на рис. 1 и у батарейки, и у ЭДС знак «+» стоит справа, а знак «-» стоит слева. Положительный «вывод» ЭДС изображают длинной чертой, отрицательный — короткой (см. рис. 1, справа).

К источнику могут подключаться самые различные приборы (*приемники*, или *потребители*): нагреватели, лампы, электродвигатели и т. п. В таком случае действует следующее соглашение: *ток через приемник течет в направлении от «плюса» источника к его «минусу»*. То есть ток «вытекает» из источника с его «+»-вывода, протекает по приемнику и «втекает» обратно в источник со стороны его «-»-вывода.

23 Закон Ома для полной цепи

Пусть источник тока (кратко — источник) подключен к резистору (рис. 1).

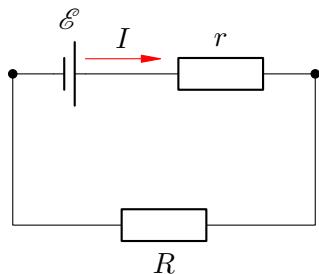


Рис. 1. Полная цепь

Источник с ЭДС \mathcal{E} и внутренним сопротивлением r и резистор R (его сопротивление называют *внешним*¹) образуют *полную цепь*. Считается, что в полной цепи ток I «вытекает» из длинной черты (положительный «вывод» ЭДС) и, соответственно, «втекает» в короткую черту (отрицательный «вывод» ЭДС).

В такой цепи справедлив **закон Ома для полной цепи**:

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

Коротким замыканием называют соединение выводов источника проводом пренебрежимо малого сопротивления (внешнее сопротивление много меньше внутреннего: $R \ll r$). Ток, протекающий в цепи в таком случае, называется *током короткого замыкания* (или *током КЗ*). Короткое замыкание обычно является *аварийным* режимом работы цепи и может привести к выходу из строя элементов цепи из-за очень большой силы тока КЗ.

При расчете цепи ее можно мысленно делить на части — *участки цепи*. Предполагается, что выделенный участок имеет два вывода. Например, в схеме, показанной на рис. 1, можно рассмотреть два участка между выделенными точками: 1) участок с ЭДС \mathcal{E} и резистором r ; 2) участок с резистором R .

Интересно отметить, что при $R = r$ в цепи с заданными \mathcal{E} и r достигается *максимальная* мощность тока на внешнем резисторе.

Задача. Сила тока в цепи батареи, ЭДС которой 30 В, равна 3 А. Напряжение на зажимах батареи 18 В. Определите внутреннее сопротивление цепи.

Решение. Зажимы батареи на схеме полной цепи (рис. 1) обозначены точками. Следовательно, напряжение на зажимах батареи есть напряжение между этими точками. Из схемы видно, что к этим же точкам присоединен и внешний резистор R , поэтому его напряжение равно напряжению на зажимах батареи. Сопротивление R тогда можно найти по закону Ома:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{18}{3} = 6 \text{ Ом.}$$

Теперь внутреннее сопротивление можно найти из формулы (1):

$$r = \frac{\mathcal{E} - IR}{I} = \frac{30 - 3 \cdot 6}{3} = 4 \text{ Ом.}$$

¹В общем случае внешним сопротивлением называют сопротивление блока резисторов, подключенного к источнику.

24 Полупроводник

Полупроводник — это тело, которое по своей способности проводить ток занимает промежуточное положение между проводниками и диэлектриками.

Удельное сопротивление полупроводника убывает с ростом температуры: при довольно *низкой температуре* полупроводник ведет себя как *диэлектрик*, а при *высокой* — как достаточно хороший *проводник*.

На рис. 1 представлена структура полупроводника на примере кремния (Si).

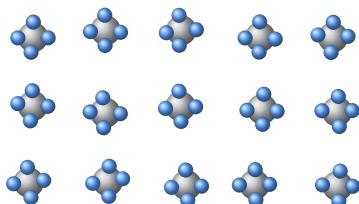


Рис. 1. Структура полупроводника

При довольно низкой температуре каждый атом (группа из одного серого и четырех прикрепленных к нему синих шаров) кремния связан с четырьмя соседними атомами с помощью своих четырех *валентных электронов*¹ (синие шары). Валентные электроны могут переходить («перескакивать») от одного атома к другому — атомы могут обмениваться своими валентными электронами (переходы этих электронов носят непредсказуемый характер).

При нагревании полупроводника тепловые колебания его частиц становятся более интенсивными, и некоторые валентные электроны могут «оторваться» от своих атомов (рис. 2).

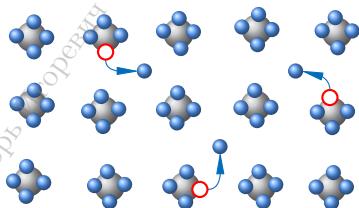


Рис. 2. Появление свободных электронов (и дырок)

Электроны, покинувшие свои атомы, становятся *свободными* (их называют *электронами проводимости*). Покидание атома электроном сопровождается образованием вакантного места с недостающим электроном — *дырки* (красная окружность). Дырку можно рассматривать как *положительный заряд*.

Если подключить полупроводник (со свободными электронами и дырками) к источнику тока, то в полупроводнике появится ток, вызванный упорядоченным движением свободных электронов и дырок: свободные электроны перемещаются к «плюсу» источника, а дырки — к «минусу» источника.

В рассмотренном примере свободные электроны и дырки образуются за счет «отрывов» валентных электронов от атомов, из которых построен *весь* (чистый) полупроводник. Это — полупроводник с *собственной проводимостью*².

¹ Валентными называют электроны, наиболее удаленные от ядра атома.

² Проводимость — это способность тела проводить ток.

25 Полупроводники *p*- и *n*-типа

Проводимость чистого полупроводника может быть значительно увеличена в результате введения примеси из атомов другого химического элемента.

На рис. 1 показана структура кремния с примесным атомом индия (In).

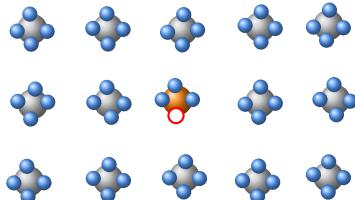


Рис. 1. Полупроводник *p*-типа

Атом индия (группа из одного оранжевого шара и трех прикрепленных к нему синих) имеет три валентных электрона (синие шары), с помощью которых этот атом «связывается» с тремя соседними атомами кремния (группа из одного серого шара и четырех прикрепленных к нему синих). Для связи с четвертым атомом кремния у атома индия не хватает электрона: здесь образуется дырка (красная окружность). Не входя в подробности, можно сказать, что каждый примесный атом индия порождает подвижную дырку (без образования свободного электрона), способную «путешествовать» по всему полупроводнику.

Примесь, атомы которой создают дырки без появления равного количества свободных электронов, называют *акцепторной*. Полупроводник с акцепторной примесью называется *полупроводником p-типа* (или *p-полупроводником*). В *p*-полупроводнике электрический ток обеспечивается в основном дырками — дырок намного больше, чем свободных электронов (дырки — *основные носители заряда*, свободные электроны — *неосновные носители заряда*).

Пусть теперь примесь мышьяка (As) внесена в кремний (рис. 2).

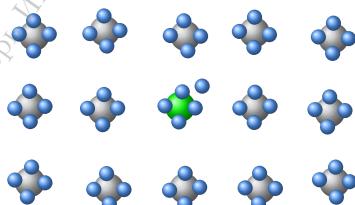


Рис. 2. Полупроводник *n*-типа

Атом мышьяка (группа из одного зеленого шара и пяти расположенных возле него синих) имеет пять валентных электронов. С помощью четырех из них этот атом «связывается» с четырьмя соседними атомами кремния. Пятый валентный электрон мышьяка, не формирующий связь с каким-либо атомом кремния, становится свободным. Каждый примесный атом мышьяка дает свободный электрон (без образования подвижной дырки).

Примесь, атомы которой дают свободные электроны без появления равного количества подвижных дырок, называют *донорной*. Полупроводник с донорной примесью — это *полупроводник n-типа* (или *n-полупроводник*). В *n*-полупроводнике свободных электронов намного больше, чем дырок (свободные электроны — *основные носители заряда*, дырки — *неосновные носители заряда*).

26 $p-n$ -Переход

$p-n$ -Переход — это место соприкосновения p - и n -полупроводников (рис. 1).

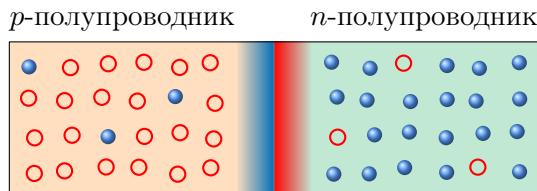


Рис. 1. $p-n$ -Переход

При образовании контакта между p - и n -полупроводниками свободные электроны (синие шары), совершая тепловое движение, проникают из n -области в p -область, а дырки (красные окружности) — из p -области в n -область (свободные электроны и дырки стремятся «смешаться» друг с другом, подобно тому как стремятся смешаться две жидкости, налитые в один сосуд).

В результате этого в пограничном слое n -полупроводника имеется недостаток электронов — этот слой оказывается заряженным *положительно* (красная область). Пограничный слой же p -полупроводника становится заряженным *отрицательно* (синяя область) вследствие ухода из него дырок и прихода в него электронов. Заряженные пограничные слои образуют так называемый *запирающий слой* (красно-синяя область): граница $p-n$ -структуры находится как бы в «конденсаторе», внутреннее поле которого (запирающее поле) препятствует дальнейшему переходу свободных электронов и дырок через границу.

Пусть $p-n$ -структура подключена к источнику тока так, что «плюс» источника подан на p -полупроводник, а «минус» — на n -полупроводник (рис. 2).

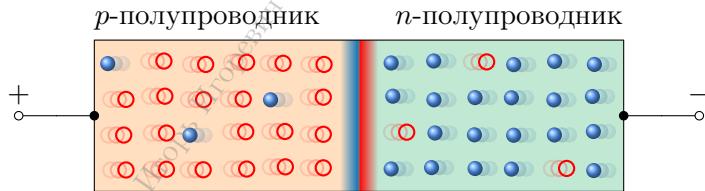


Рис. 2. Прямое включение $p-n$ -перехода

Внешнее электрическое поле, создаваемое заряженными выводами источника («+» и «-») внутри структуры, направлено *против* запирающего поля: на рис. 2 внешнее поле вблизи границы направлено вправо, а запирающее поле — влево. Переходы основных носителей заряда (свободных электронов в n -полупроводнике и дырок в p -полупроводнике) через границу облегчаются: внешнее поле «помогает» свободным электронам и дыркам преодолеть запирающий слой (они массово перемещаются через границу контакта: свободные электроны устремляются к «плюсу» источника, а дырки — к его «минусу»). В этом случае сопротивление $p-n$ -перехода малое, и *ток через переход оказывается большим* (источник практически замкнут *накоротко*).

Показанный на рис. 2 способ подключения $p-n$ -перехода к источнику называется *прямым включением* $p-n$ -перехода. При *обратном включении* $p-n$ -переход подключается наоборот: p -область соединяется с «минусом» источника, n -область — с «плюсом» (в таком случае *ток через переход пренебрежимо мал*).

Глава 3

Магнитное поле

27 Магнит. Магнитное поле

Магнит — это тело, способное притягивать железные предметы¹. На рис. 1 изображен магнит, притягивающий два стальных тела.

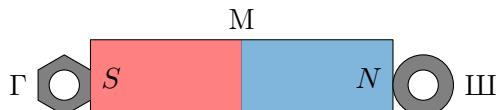


Рис. 1. Магнит, притягивающий стальные предметы

Магнит М притягивает гайку Г и шайбу III. У всякого магнита есть *два* места, вблизи которых он действует на тела наиболее сильно; это так называемые *полюса* магнита. *Северный полюс* магнита обозначается синим цветом и буквой *N*, *южный полюс* — красным цветом и буквой *S* (рис. 1). (Магнит, показанный на рис. 1, называют *полосовым*; если подвесить такой магнит на нити за его середину, позволяя ему свободно вращаться, то северный *N*-полюс магнита всегда будет поворачиваться в направлении Северного географического полюса Земли и указывать на географический север: отсюда и возникло название «северный полюс» магнита.)

Разноименные магнитные полюсы притягиваются друг к другу, а одноименные — друг от друга отталкиваются (рис. 2).

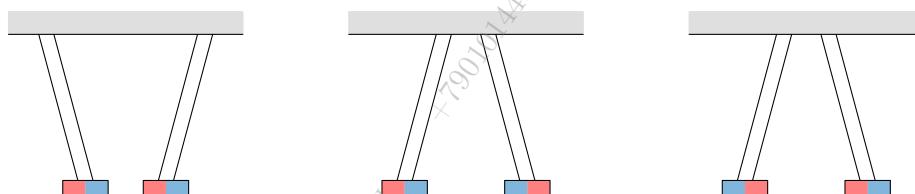


Рис. 2. Притяжение и отталкивание магнитов

Считают, что взаимодействие магнитов осуществляется посредством *магнитного поля* — формы материи, окружающей магниты (поле можно представить себе как невидимое истечение из тела воображаемой жидкости и т. п.). Сказанное проиллюстрировано на рис. 3: поле магнита А «отталкивает» магнит Б от магнита А (и наоборот; на рис. 3 магниты обращены друг к другу одноименными полюсами).

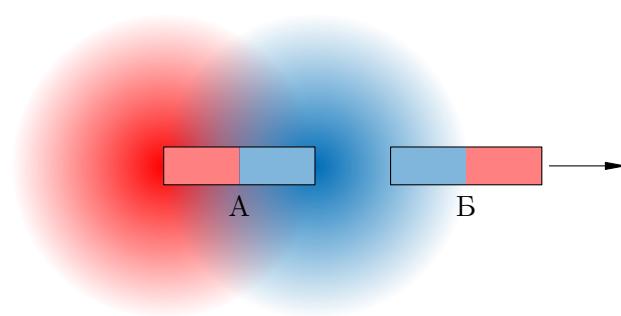


Рис. 3. Действие поля одного магнита на другой

¹Или предметы из сплава железа (например, из стали).

28 Магнитная стрелка

Обнаружить магнитное поле в данной области пространства можно с помощью *магнитной стрелки* — маленького магнита. Магнитная стрелка, свободно вращающаяся на оси, — неотъемлемый элемент простого компаса (рис. 1; здесь и далее северный магнитный полюс (N) обозначен синим цветом, южный (S) — красным).

Магнитная стрелка, способная вращаться вокруг вертикальной оси, вблизи поверхности Земли устанавливается всегда так, что северный полюс N (северный конец) стрелки указывает на географический север Земли.

На рис. 2 показано, как ориентируются магнитные стрелки, расположенные у поверхности планеты в произвольных местах.

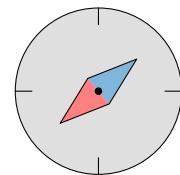


Рис. 1.
Компас

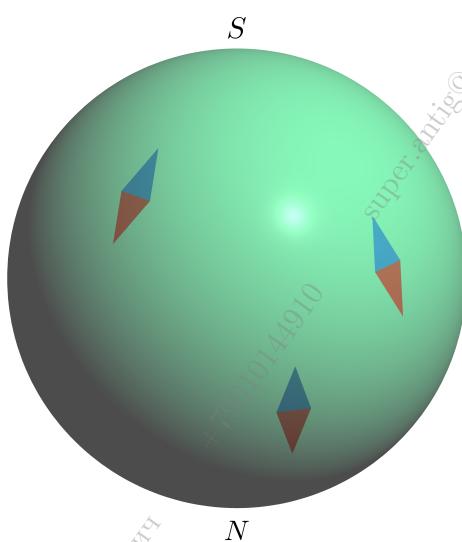


Рис. 2. Установление магнитных стрелок у поверхности планеты

Установление магнитной стрелки в определенном направлении в данном месте у поверхности планеты объясняется тем, что планета сама является огромным магнитом, который действует на магнитную стрелку.

В случае Земли N -полюс стрелки притягивается к южному магнитному полюсу планеты (обозначен буквой S на рис. 2), который находится недалеко от Северного географического полюса Земли. Соответственно, S -полюс стрелки притягивается к северному магнитному полюсу планеты (обозначен буквой N на рис. 2), который находится около Южного географического полюса Земли.

Опыт показывает, что N -полюс стрелки притягивается к S -полюсу магнита и отталкивается от его N -полюса. S -полюс стрелки, наоборот, притягивается к N -полюсу магнита и отталкивается от его S -полюса (рис. 3).

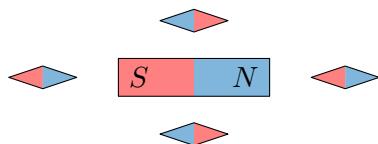


Рис. 3. Установление магнитных стрелок возле магнита

29 Индукция и линии магнитного поля

Индукция (\vec{B} [Тл]) — это характеристика силовой способности магнитного поля в точке пространства. В каждой точке пространства вектор \vec{B} направлен туда же, куда и северный конец (*N*-полюс) *магнитной стрелки*, помещенной в данную точку (рис. 1, слева).

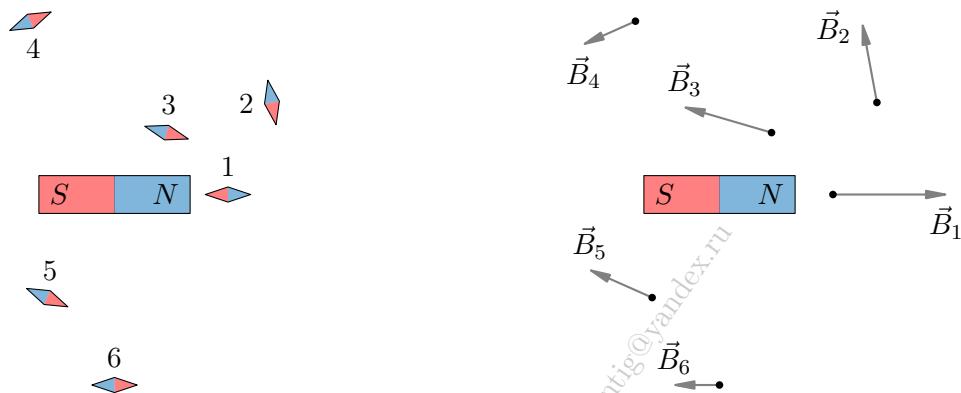


Рис. 1. Стрелки и соответствующие векторы индукции

Возле магнита расположены шесть магнитных стрелок, способных свободно вращаться вокруг своих центров. На рис. 1 (справа) изображены шесть векторов индукции поля магнита: каждой магнитной стрелке отвечает свой вектор \vec{B} .

Наглядно описывать магнитное поле в пространстве принято с помощью **линий магнитного поля** — линий, идущих вдоль векторов индукции поля в различных точках пространства¹.

На рис. 2 показана картина линий поля полосового магнита.

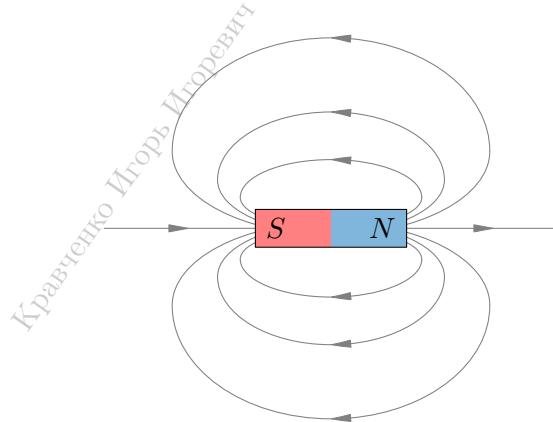


Рис. 2. Линии магнитного поля полосового магнита

Линии поля выходят из северного полюса магнита и входят в южный полюс (линии не пересекаются; внутри магнита они замыкаются). Чем больше густота линий, тем большее индукция поля в данной области пространства.

Именно вдоль линий поля выстраиваются магнитные стрелки (или железные опилки), размещенные возле магнита.

¹Эти линии называют также *линиями индукции* или *магнитными силовыми линиями*. Всякая линия поля изображается так, что в любой ее точке вектор индукции направлен по касательной к линии поля.

30 Сложение магнитных полей

Магнитное поле, создаваемое несколькими магнитами, можно рассматривать как наложение полей, создаваемых каждым магнитом в отдельности.

Принцип суперпозиции магнитных полей. Если магниты M_1, M_2, \dots по отдельности создают в данной точке поля $\vec{B}_1, \vec{B}_2, \dots$, то вместе они создают в данной точке поле

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots \quad (1)$$

Этот принцип можно проиллюстрировать для случая двух магнитов (рис. 1).

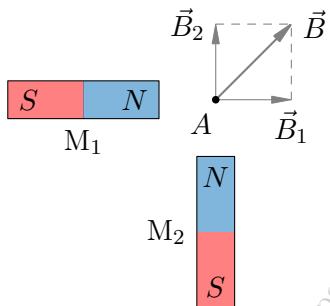


Рис. 1. Принцип суперпозиции магнитных полей

Магнит M_1 создает в точке A поле \vec{B}_1 , а магнит M_2 в этой же точке создает поле \vec{B}_2 . Согласно вышеуказанному принципу вместе они создают в точке A поле $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$ (рис. 1).

Индукции магнитных полей в общем случае складываются векторно.

Задача. Два одинаковых магнита M_1 и M_2 расположены так, что их оси лежат на одной прямой OO' ; магниты обращены друг к другу одноименными полюсами (рис. 2). Чему равен модуль результирующего вектора магнитной индукции в точке A , лежащей на прямой OO' и равноудаленной от обоих магнитов?

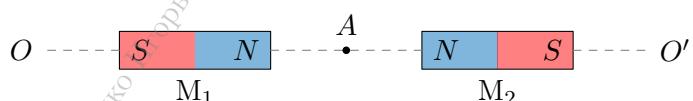


Рис. 2. К задаче

Решение. Так как точка A одинаково удалена от одноименных полюсов магнитов M_1 и M_2 (или густота собственных магнитных линий каждого магнита в этой точке одинакова), то соответствующие магнитные индукции \vec{B}_1 и \vec{B}_2 , создаваемые этими магнитами в данной точке, одинаковы по величине (рис. 3).



Рис. 3. К задаче

Так как векторы \vec{B}_1 и \vec{B}_2 равны по модулю и противоположны по направлению, то результирующий вектор \vec{B} , вычисляемый по формуле (1), равен нулю: $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 = 0$. Соответственно, модуль вектора \vec{B} равен нулю.

31 Опыт Эрстеда

Магнитными свойствами обладает также электрический ток. Обнаружить на опыте эти свойства тока и изучить их удалось в опыте Эрстеда.

Схема опыта Эрстеда показана на рис. 1.

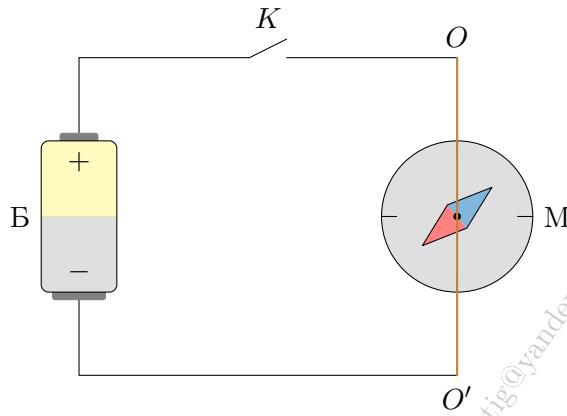


Рис. 1. Опыт Эрстеда: тока в цепи нет

Над магнитной стрелкой М (стрелкой компаса) расположен провод OO' , подключенный через ключ K к батарейке Б. Если ключ разомкнут (в цепи из батарейки и проводников нет тока), то магнитная стрелка указывает на (географический) север Земли.

Пусть теперь ключ в рассмотренной схеме замыкают (рис. 2).

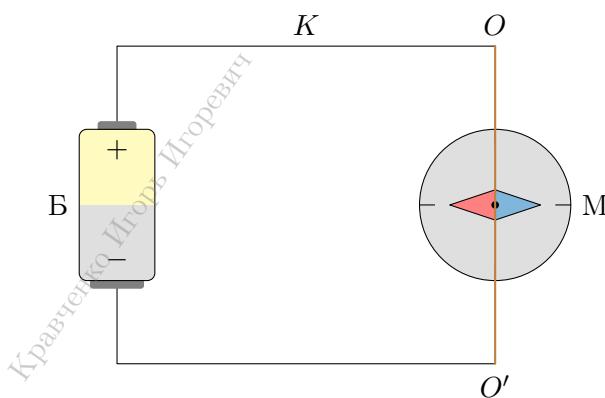


Рис. 2. Опыт Эрстеда: ток в цепи есть

Замыкание ключа K приводит к протеканию тока в цепи из батарейки Б и проводников. При достаточно большом токе в цепи магнитная стрелка М устанавливается *перпендикулярно* проводу OO' . Оказывается, отклонение магнитной стрелки вызвано действием на нее со стороны провода OO' с током (стрелка и провод с током взаимодействуют друг с другом подобно тому, как магнитная стрелка взаимодействует с постоянным магнитом). При размыкании ключа магнитная стрелка возвращается в свое начальное положение.

Опыт Эрстеда показывает, что *электрический ток создает в окружающем пространстве магнитное поле*.

32 Магнитное поле прямого провода с током

Пусть имеется прямой провод, через который протекает электрический ток. На рис. 1 показана картина линий магнитного поля вокруг провода в таком случае.

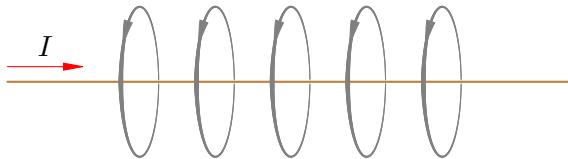


Рис. 1. Линии магнитного поля прямого провода с током

Линии поля прямого провода с током являются окружностями. Центры этих окружностей лежат на проводе, при этом окружности лежат в плоскостях, перпендикулярных проводу (см. рис. 1).

Через любую точку пространства вне провода можно провести соответствующую линию (в форме окружности) его магнитного поля. С удалением от провода густота линий поля убывает (убывает индукция магнитного поля).

Для определения направления линий магнитного поля прямого тока можно пользоваться следующим правилом.

Правило правой руки. Если большой палец правой руки расположить так, чтобы он указывал направление тока в проводе, то остальные согнутые пальцы (охватывающие провод) укажут направление линий магнитного поля, создаваемого этим током.

Рисунок 2 иллюстрирует применение этого правила.

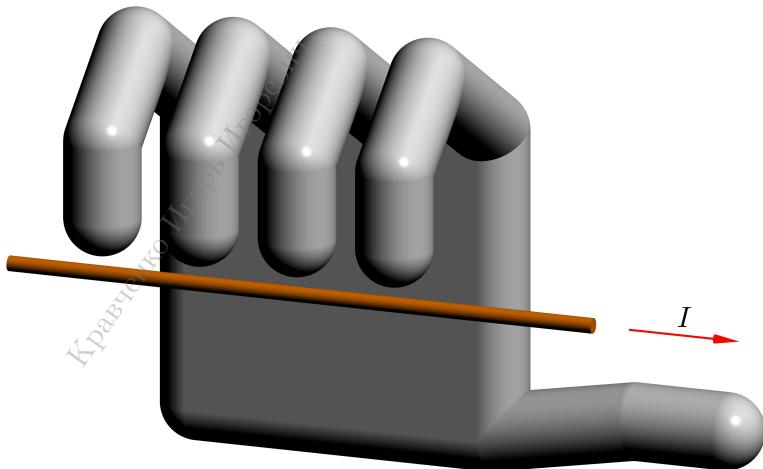


Рис. 2. Правило правой руки

Сопоставляя рисунки 1 и 2, можно видеть, что согнутые пальцы на рис. 2 указывают направление линий магнитного поля вокруг провода.

Задача. Два одинаковых изолированных тонких провода с противоположно направленными равными токами плотно вставлены в узкую пластиковую трубку. Что можно сказать о магнитном поле вокруг трубки?

Решение. С помощью правила правой руки можно убедиться, что поля токов компенсируют друг друга — магнитное поле вокруг трубки отсутствует.

33 Магнитное поле кольца с током

Пусть имеется провод в форме кольца, через который протекает электрический ток. На рис. 1 показана картина линий магнитного поля кольца с током.

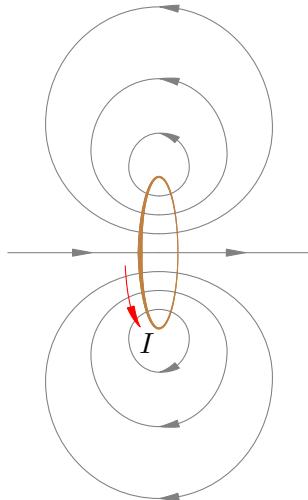


Рис. 1. Линии магнитного поля кольцевого провода с током

Линии поля кольца как бы выходят из него со одной стороны и входят в него с другой стороны (внутри кольца линии замыкаются).

Для определения того, с какой стороны из кольца выходят линии его магнитного поля, можно воспользоваться следующим правилом.

Правило правой руки. Направление линий магнитного поля *внутри* кольца укажет большой палец правой руки, если остальные согнутые пальцы (охватывающие кольцо) расположены так, что они указывают направление тока кольца.

Рисунок 2 иллюстрирует применение этого правила.

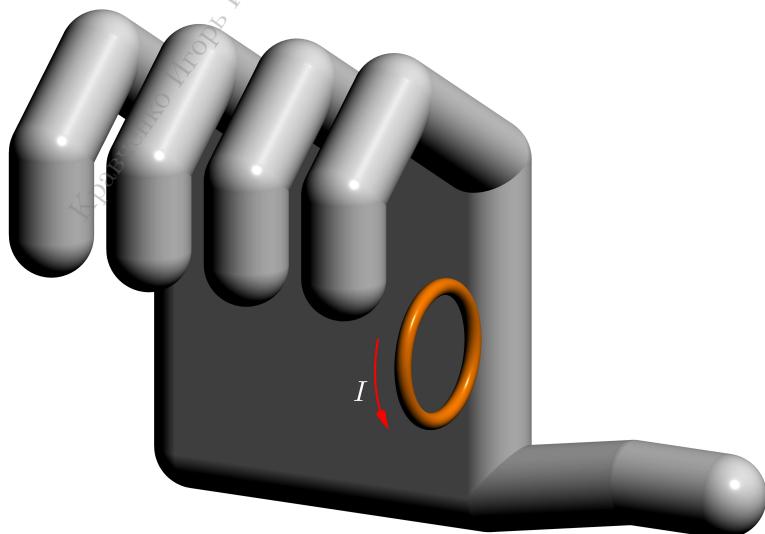


Рис. 2. Правило правой руки

Соотнося рисунки 1 и 2, можно видеть, что большой палец на рис. 2 указывает направление линий магнитного поля внутри кольца.

34 Магнитное поле катушки с током

Пусть имеется цилиндрическая катушка, состоящая из нескольких витков провода, намотанного по винтовой линии (*соленоид*). На рис. 1 показана картина линий магнитного поля катушки с током.

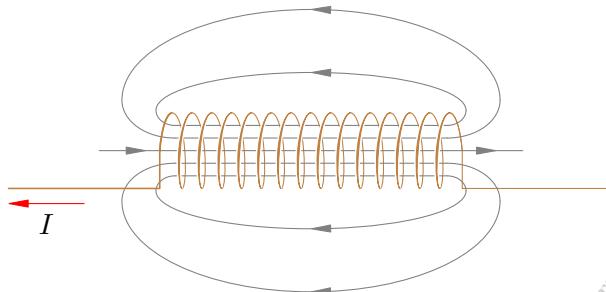


Рис. 1. Линии магнитного поля катушки с током

Линии поля катушки как бы выходят из нее со одной стороны и входят в нее с другой стороны (внутри катушки линии замыкаются).

Для определения того, с какой стороны из катушки выходят линии ее магнитного поля, можно воспользоваться следующим правилом.

Правило правой руки. Направление линий магнитного поля *внутри* катушки укажет большой палец правой руки, если остальные согнутые пальцы (охватывающие катушку) расположены так, что они указывают направление тока в катушке.

Рисунок 2 иллюстрирует применение этого правила.

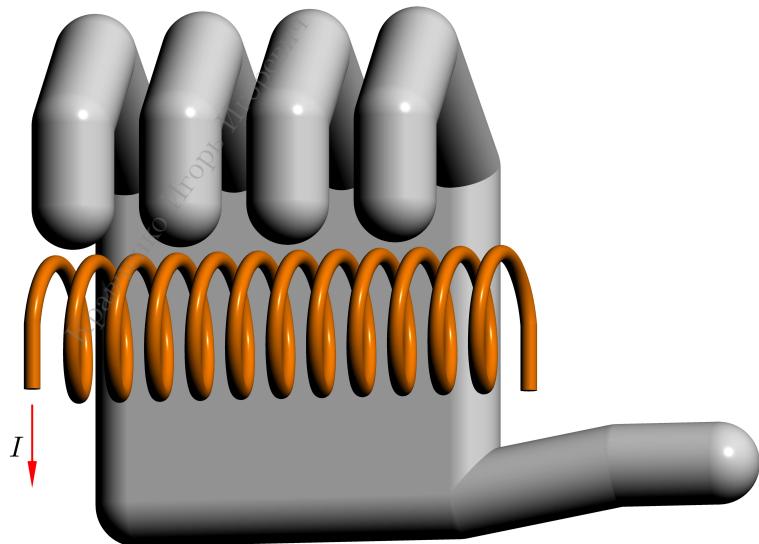


Рис. 2. Правило правой руки

Сопоставляя рисунки 1 и 2, можно убедиться, что большой палец на рис. 2 указывает направление линий магнитного поля внутри катушки.

При плотной намотке витков *внутри* достаточно длинной катушки вдали от ее краев магнитное поле является *однородным*: из рис. 1 видно, что *линии однородного поля являются параллельными прямыми одинаковой густоты*.

35 Сила Ампера

Сила Ампера (F_A [Н]) — это сила, действующая на провод с током со стороны магнитного поля:

$$F_A = IBl \sin \alpha, \quad (1)$$

где I — сила тока в проводе, B — индукция магнитного поля, l — длина провода (находящегося в магнитном поле), α — угол между направлениями тока I и поля B .

Пусть провод с током помещен между полюсами дугового магнита (рис. 1).

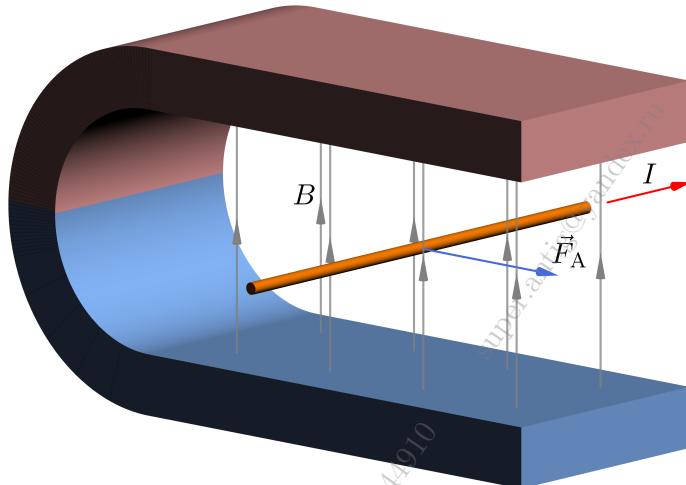


Рис. 1. Сила Ампера

Поле магнита с индукцией B (его линии изображены серым цветом) действует на провод с током I с силой Ампера \vec{F}_A . Направление силы Ампера можно определять по следующему правилу.

Правило левой руки. Если расположить левую руку так, чтобы вытянутые четыре пальца указывали направление тока, а линии поля входили в ладонь, то отведенный перпендикулярно большой палец (лежащий в одной плоскости с остальными пальцами) укажет направление силы Ампера.

Рисунок 2 иллюстрирует применение этого правила.

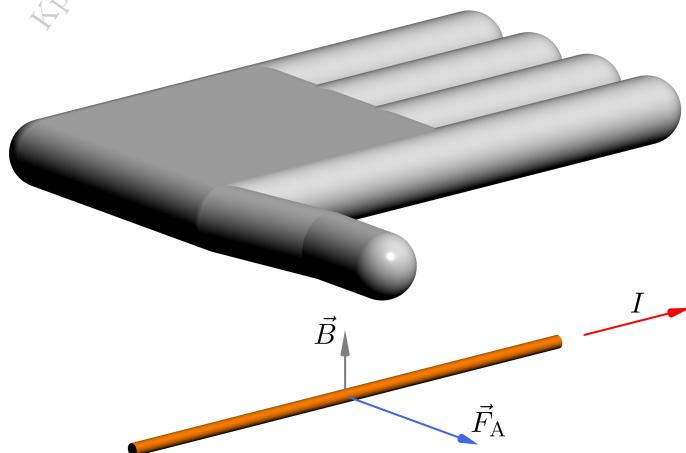


Рис. 2. Правило левой руки

36 Сила Лоренца

Сила Лоренца (F_Λ [Н]) — это сила, действующая на движущийся заряд со стороны магнитного поля:

$$F_\Lambda = qBv \sin \alpha, \quad (1)$$

где q — величина заряда, B — индукция магнитного поля, v — скорость заряда, α — угол между направлениями скорости v и поля B .

Пусть заряд влетает в пространство между полюсами магнита (рис. 1).

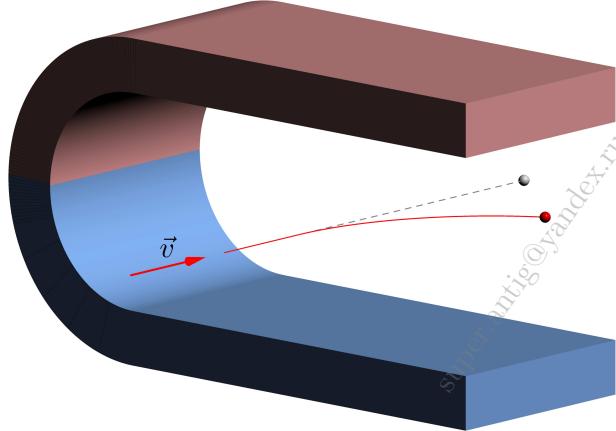


Рис. 1. Отклонение движения заряда в магнитном поле

Положительный заряд (красный шар), движущийся со скоростью \vec{v} , при попадании в поле магнита (оно сосредоточено практически между его полюсами) отклоняется от первоначального направления движения под действием силы Лоренца (для сравнения серой штриховой линией показана траектория движения незаряженной частицы). Вот правило для определения направления этой силы.

Правило левой руки. Если расположить левую руку так, чтобы вытянутые четыре пальца указывали направление скорости *положительного* заряда, а линии поля входили в ладонь, то отведенный перпендикулярно большой пальцу (лежащий в одной плоскости с остальными пальцами) укажет направление силы Лоренца (если заряд отрицательный, то четыре пальца устанавливают *против* его скорости).

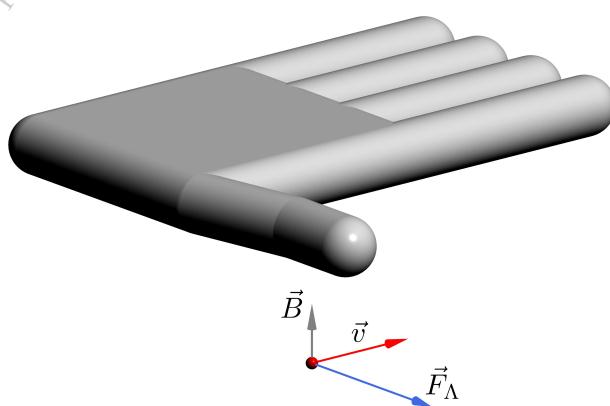


Рис. 2. Правило левой руки

Глава 4

Электромагнитная индукция

37 Магнитный поток

Пусть имеются два проводящих контура¹ в магнитном поле (рис. 1).

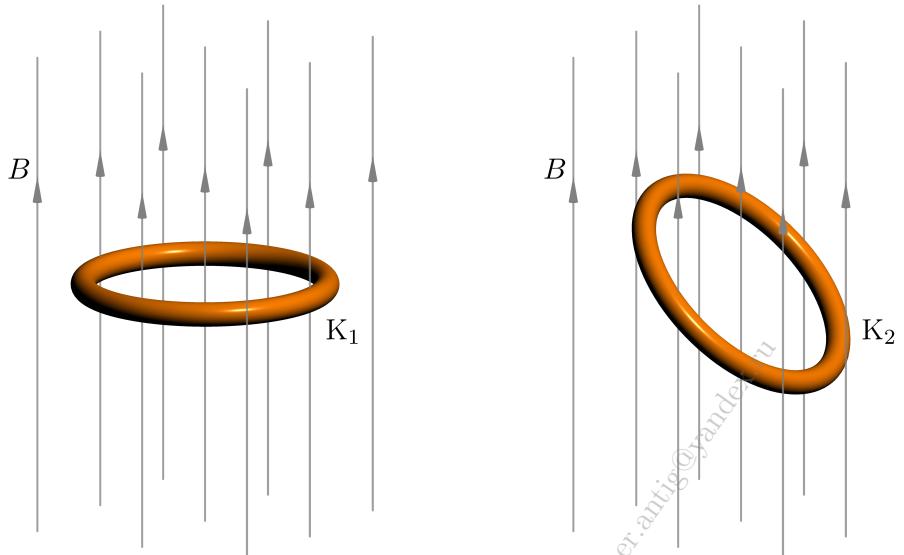


Рис. 1. Два контура в магнитном поле

Контуры K_1 и K_2 (кольца) расположены в однородном магнитном поле B . Плоскость контура K_1 перпендикулярна линиям поля, а через плоскость контура K_2 линии поля проходят *не* перпендикулярно. Из рис. 1 видно, что кольцо K_1 пронизывается большим количеством линий магнитного поля, чем кольцо K_2 : в таком случае говорят, что магнитный поток через кольцо K_1 больше, чем через кольцо K_2 .

Магнитный поток (Φ [Вб]) — это характеристика *количества линий* магнитного поля, пронизывающих контур:

$$\Phi = BS \cos \alpha, \quad (1)$$

где B — индукция магнитного поля (в котором находится контур), S — площадь контура, α — угол между вектором \vec{B} и перпендикуляром к плоскости контура.

На рис. 2 изображен пример к определению магнитного потока.

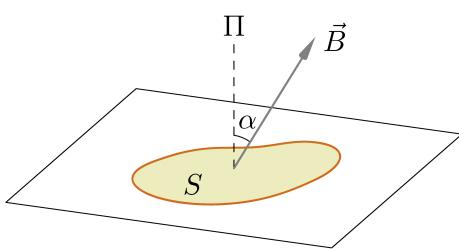


Рис. 2. Контур произвольной формы в магнитном поле

В магнитном поле с индукцией \vec{B} расположен произвольный контур площади S так, что вектор \vec{B} образует угол α с перпендикуляром Π к плоскости контура. Формула (1) дает магнитный поток через этот контур: $\Phi = BS \cos \alpha$.

¹Контур — это фигура, образованная замкнутой линией в пространстве.

38 Закон электромагнитной индукции Фарадея

Электромагнитная индукция — это явление возникновения электрического тока в проводящем контуре при изменении магнитного потока через контур.

На рис. 1 изображена схема опыта по обнаружению явления электромагнитной индукции.

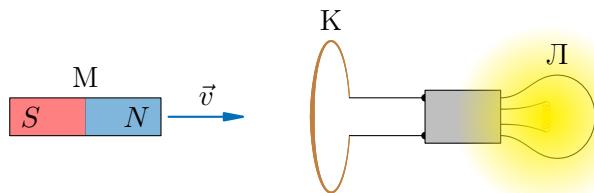


Рис. 1. Магнит перемещают относительно проводящего контура

При *вдвигании* магнита М в контур, образованный кольцевым проводником К и лампой Л, загорается лампа, что свидетельствует о протекании тока через данный контур. Также лампа загорается, если магнит *выдвигать* из этого контура или если *двигать сам контур* относительно покоящегося магнита.

Появление тока в контуре в рассмотренной ситуации объясняют *изменением количества линий магнитного поля, пронизывающих контур*. Ток, который наводится в контуре вследствие изменения количества этих линий внутри контура, называют *индукционным током*.

Практически удобно считать, что индукционный ток вызывается как бы «невидимой батарейкой», которая «появляется» в контуре (рис. 2).

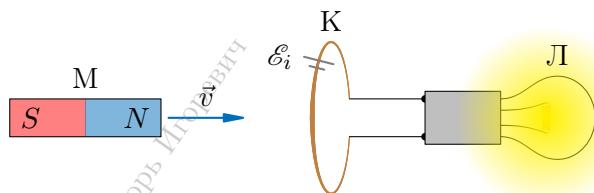


Рис. 2. «Невидимая батарейка» в контуре вызывает индукционный ток

При изменении количества линий магнитного поля, пронизывающих контур, в нем как бы образуется «невидимая батарейка» с так называемой *ЭДС индукции* \mathcal{E}_i (внутреннее сопротивление у такой «батарейки» отсутствует). Эта «батарейка» и вызывает ток в проводящем контуре в данном случае.

Закон электромагнитной индукции Фарадея. При изменении магнитного потока через контур в этом контуре возникает ЭДС индукции, равная скорости изменения магнитного потока, взятой со знаком минус:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\Phi'. \quad (1)$$

Так, чем быстрее двигают магнит в рассмотренном опыте (то есть чем быстрее меняется магнитный поток через контур), тем большая ЭДС индукции возникает в контуре, и тем, соответственно, большая сила индукционного тока регистрируется в нем.

39 ЭДС индукции в движущемся проводе

Пусть прямой провод перемещается в постоянном магнитном поле (рис. 1).

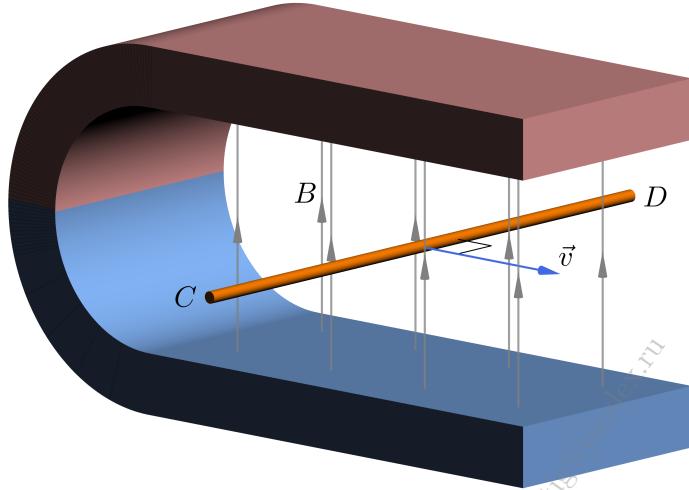


Рис. 1. Движение провода в магнитном поле

Провод CD движется в магнитном поле B в плоскости, перпендикулярной линиям поля, поступательно так, что его скорость \vec{v} образует прямой угол с осью провода ($\vec{v} \perp CD$). Опыт показывает, что в этом случае между концами провода возникает *напряжение*. В проводе как бы появляется «невидимая батарейка» с ЭДС индукции (без внутреннего сопротивления).

ЭДС индукции в движущемся проводе при его движении в магнитном поле равна:

$$\mathcal{E}_i = Bvl \cos \alpha, \quad (1)$$

где B — индукция магнитного поля, v — скорость провода, l — длина провода (находящегося в магнитном поле; $\vec{v} \perp l$), α — угол между вектором \vec{B} и перпендикуляром к плоскости движения провода.

На рис. 2 изображен пример к определению ЭДС индукции в движущемся проводе.

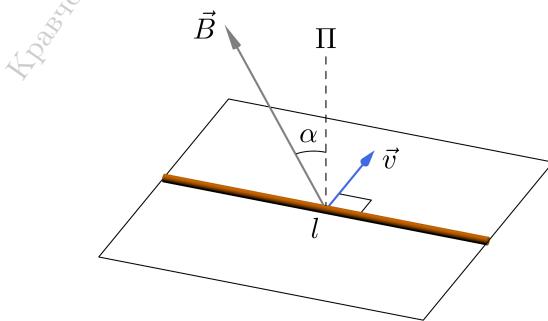


Рис. 2. К определению ЭДС индукции в движущемся проводе

В магнитном поле с индукцией \vec{B} поступательно движется провод длиной l со скоростью \vec{v} (причем $\vec{v} \perp l$), при этом вектор \vec{B} образует угол α с перпендикуляром Π к плоскости движения. Формула (1) дает ЭДС индукции в этом проводе: $\mathcal{E}_i = Bvl \cos \alpha$.

40 Правило Ленца

Как известно, магнит, вдвигаемый в проводящий контур¹, вызывает протекание индукционного тока в контуре (рис. 1).

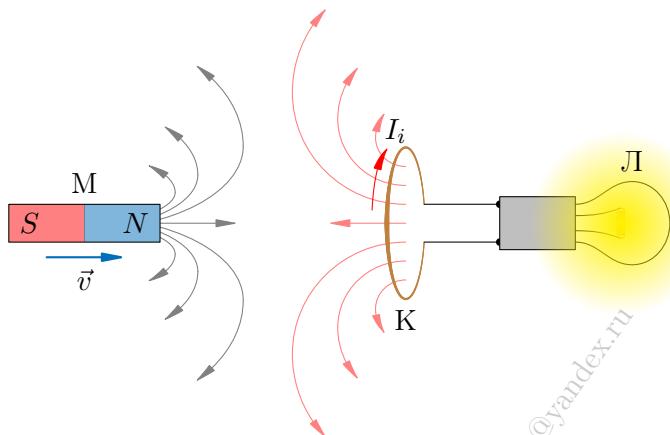


Рис. 1. Линии внешнего и собственного магнитных полей

Магнит М вдвигают в контур, образованный кольцевым проводником К и лампой Л. Изменение количества линий так называемого *внешнего* магнитного поля (поля магнита) через контур приводит к появлению индукционного тока I_i в контуре (линии внешнего поля изображены серым цветом). Так как ток порождает вокруг себя магнитное поле, то контур «создает» свое *собственное* магнитное поле (линии собственного поля изображены светло-красным цветом).

Магнитный поток внешнего поля через контур называют *внешним магнитным потоком*. Магнитный поток собственного поля через контур называется соответственно *собственным магнитным потоком*.

Правило Ленца. Индукционный ток имеет такое направление, что собственный магнитный поток *препятствует изменению* внешнего магнитного потока.

Вот удобное правило для решения задач: контур «стремится создать» свое поле так, что число его линий «препятствует изменению числа линий *внешнего поля через него* (*компенсирует это изменение*). Иными словами, контур «стремится создать» свое поле таким образом, чтобы *общее количество линий* (и внешнего и собственного) полей через него оставалось *неизменным*.

Так, в ситуации на рис. 1 число линий внешнего поля (серых линий) через контур увеличивается. Проводящий контур «создает» свои линии поля (светло-красные линии) так, что они «препятствуют» изменению числа серых линий через контур: в данном случае линии собственного поля направлены против линий внешнего поля.

Магнит, приближающийся (или удаляющийся) к проводящему контуру, действует на контур с некоторой силой (магнит и контур взаимодействуют друг с другом подобно тому, как взаимодействуют два магнита). *Контур всегда стремится отклоняться в сторону движения магнита.* Например, в рассмотренном опыте (рис. 1) сила, действующая на контур со стороны магнита, направлена вправо (если бы контур был подвешен на нити, он бы отклонялся вправо).

¹Или выдвигаемый из проводящего контура (роль магнита может выполнять также проводник с током — например, катушка с током).

41 Катушка. Самоиндукция

Магнитный поток катушки, создаваемый током в ней и пронизывающий ее, равен:

$$\Phi_L = LI, \quad (1)$$

где L — индуктивность катушки¹, I — ток в катушке.

Говорят, что индуктивность — это способность катушки накапливать энергию магнитного поля.

Энергия катушки рассчитывается по формуле:

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

Самоиндукция — это явление возникновения ЭДС в контуре (катушке) при изменении силы тока в этом же самом контуре (катушке). Схема опыта по обнаружению явления самоиндукции показана на рис. 1 (слева).

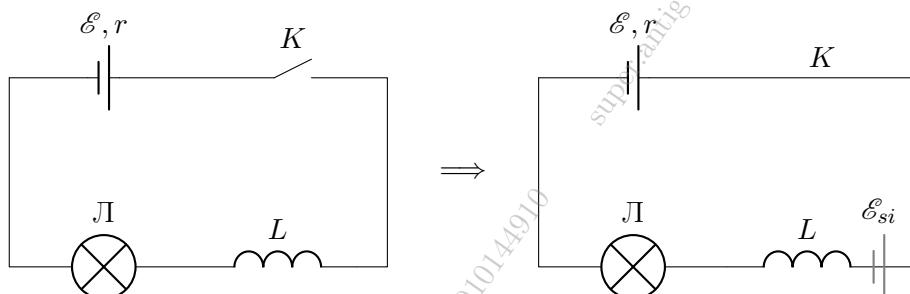


Рис. 1. К опыту по обнаружению явления самоиндукции

Имеется цепь, состоящая из последовательно соединенных катушки индуктивности L и лампы L , подключенных к батарейке \mathcal{E}, r через ключ K . При разомкнутом ключе тока в цепи нет, лампа не горит.

Пусть теперь ключ в рассмотренной схеме замыкают (рис. 1, справа).

Сразу после замыкания ключа K тока в цепи нет. Это объясняется тем, что в катушке возникает ЭДС самоиндукции \mathcal{E}_{si} , препятствующая изменению тока через катушку² (постоянный ток в цепи устанавливается спустя некоторое время — соответственно, лампа загорается постепенно).

ЭДС самоиндукции в катушке при изменении тока в ней находится по формуле:

$$\mathcal{E}_{si} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} = -LI'. \quad (3)$$

ЭДС индукции будет возникать в катушке при любом способе изменения магнитного потока катушки (по закону электромагнитной индукции Фарадея):

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta \Phi_L}{\Delta t} = -\Phi'_L.$$

¹Индуктивность — это характеристика катушки (контура), показывающая ее способность создавать магнитное поле. В общем случае индуктивность катушки определяется так: $L = \frac{\mu \mu_0 N^2 S}{l}$, где μ — магнитная проницаемость вещества внутри катушки, μ_0 — магнитная постоянная, N — число витков катушки, S — площадь поперечного сечения катушки, l — длина катушки.

²Говорят, что ток в катушке не может измениться скачком.

Глава 5

Электромагнитные колебания и волны

42 Электромагнитные колебания

Электромагнитные колебания — это периодические изменения заряда, тока и напряжения в электрической цепи. Изучение электромагнитных колебаний удобно начинать с рассмотрения процессов в *колебательном контуре* — замкнутой цепи из конденсатора и катушки.

Пусть заряженный конденсатор замыкают на катушку (рис. 1, слева).

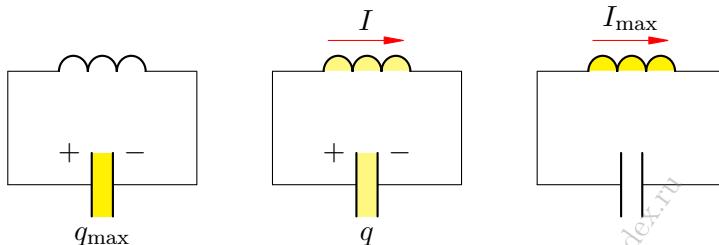


Рис. 1. Электромагнитные колебания в колебательном контуре

Сразу после замыкания цепи начинаются электромагнитные колебания — периодические изменения заряда на конденсаторе и тока в катушке (это *свободные* колебания; они совершаются только за счет энергии, запасенной в контуре — внешних воздействий нет). Период колебаний обозначается через T . При $t = 0$ (рис. 1, слева) конденсатор с начальным зарядом q_{\max} начинает разряжаться, ток в катушке равен нулю (ток в ней не может измениться скачком). При $0 < t < T/4$ (рис. 1, посередине) конденсатор с зарядом q (при этом $q < q_{\max}$) разряжается, ток I в катушке нарастает. При $T/4$ (рис. 1, справа) конденсатор *разряжен*, ток в катушке достиг максимального значения I_{\max} .

Теперь конденсатор начинает *перезаряжаться* (рис. 2, слева).

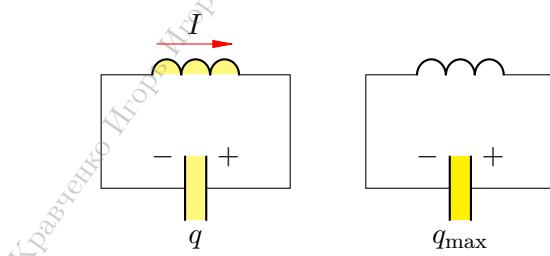


Рис. 2. Электромагнитные колебания в колебательном контуре

При $T/4 < t < T/2$ (рис. 2, слева) на обкладках конденсатора появляются заряды противоположного знака по сравнению с теми, что были вначале; ток в катушке убывает. При $t = T/2$ (рис. 2, справа) конденсатор перезарядился — его заряд снова равен q_{\max} (однако полярность другая); тока в катушке нет.

При $T/2 < t < T$ процессы в колебательном контуре повторяются, но идут в обратном направлении («обратно» заряженный конденсатор разряжается; в катушке нарастает ток в противоположном направлении по сравнению с тем, что было при $0 < t < T/2$).

Желтым цветом обозначено сосредоточение *энергии* в колебательном контуре при колебаниях — элементы как бы обмениваются энергией между собой.

43 Свободные колебания в контуре

Свободные (*собственные*) электромагнитные колебания, происходящие в колебательном контуре, оказываются гармоническими. Так, заряд конденсатора меняется во времени по закону косинуса (или синуса):

$$q = q_{\max} \cos(\omega t + \varphi), \quad (1)$$

где q_{\max} — амплитуда заряда (наибольшее значение заряда), ω — циклическая частота (или круговая частота), φ — начальная фаза.

Ток катушки и напряжение конденсатора можно вычислять через заряд конденсатора:

$$I = q', \quad U = \frac{q}{C}, \quad (2)$$

где q' — производная заряда по времени, C — емкость конденсатора.

На рис. 1 изображены графики колебаний заряда конденсатора и тока катушки в контуре (в одних координатных осях).

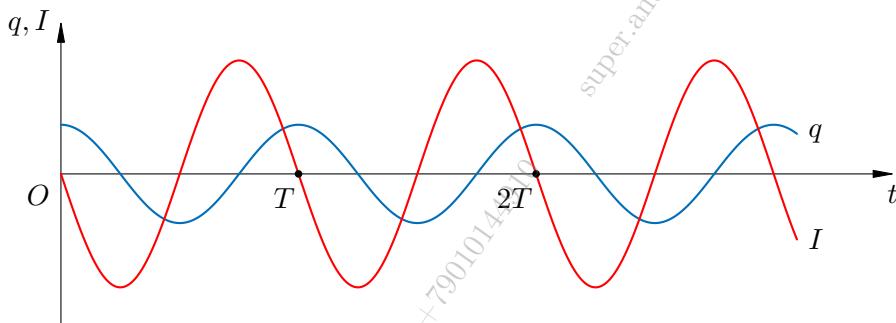


Рис. 1. Графики колебаний заряда и тока в контуре

Ток и заряд колеблются с периодом T . При этом нули заряда приходятся на максимумы или минимумы тока; и наоборот, нули тока соответствуют максимумам или минимумам заряда.

Период колебаний в контуре находят так (*формула Томсона*):

$$T = 2\pi\sqrt{LC}, \quad (3)$$

где L и C — индуктивность катушки и емкость конденсатора.

При решении задач удобно использовать понятие полной энергии контура.

Полная энергия контура (W [Дж]) — это сумма энергий катушки и конденсатора:

$$W = W_L + W_C. \quad (4)$$

Следующий закон обычно применяется при решении задач, сформулированных в терминах энергии.

Закон сохранения полной энергии контура. Если сопротивление контура равно нулю (энергия перераспределяется только между катушкой и конденсатором), то полная энергия контура сохраняется:

$$W_1 = W_2 = \dots, \quad (5)$$

где W_1 и W_2 — полные энергии контура в первом и втором состояниях.

44 Вынужденные колебания в контуре

Электромагнитные колебания в колебательном контуре называются *вынужденными*, если они возникают под действием периодической *вынуждающей* силы.

Так, вынужденные колебания совершаются в контуре, подключенным к источнику *синусоидального* напряжения (рис. 1).

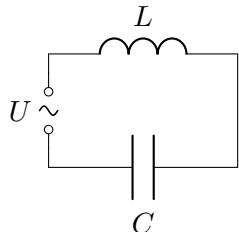


Рис. 1. Вынужденные колебания

Пусть в схеме, показанной на рис. 1, напряжение источника¹ меняется по закону: $U = U_0 \sin(\omega t)$. Тогда в контуре происходят колебания заряда и тока с *вынужденной* циклической частотой ω . (Если бы колебания в контуре были свободными, то они совершались бы с *собственной* циклической частотой ω_c контура, равной²: $\omega_c = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.)

На рис. 2 приведен график зависимости амплитуды силы тока в контуре от циклической частоты (*резонансная кривая*).

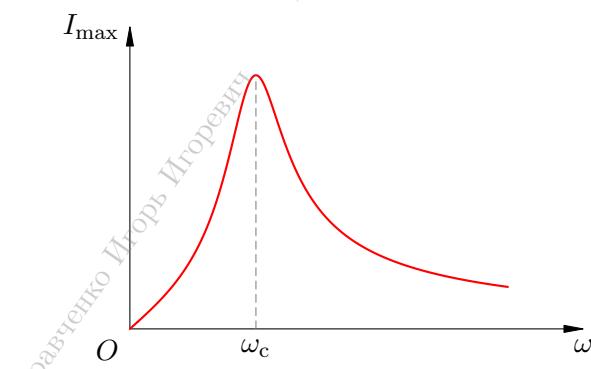


Рис. 2. Резонансная кривая

Как видно из рисунка, амплитуда тока тем больше, чем ближе вынужденная частота ω к собственной частоте ω_c контура. При $\omega = \omega_c$ (возможно, приблизительно) наступает *резонанс* — возрастание амплитуды колебаний. При $\omega \rightarrow 0$ ток в контуре равен нулю (ток малой частоты — это практически постоянный ток, который через конденсатор пройти не может); ток также равен нулю при $\omega \rightarrow \infty$ (при быстром изменении тока в катушке возникает большая ЭДС самоиндукции, препятствующая увеличению тока).

В случае колебаний в контуре (свободных или вынужденных) в нем протекает так называемый *переменный ток* — ток, изменяющийся с течением времени.

¹На схеме выводы источника — это выколотые точки.

²Подстановка формулы Томсона в определение циклической частоты.

45 Электроэнергия

Любой ток (постоянный или переменный) несет с собой энергию, называемую *электроэнергией* (ЭЭ). Например, электрическая лампа функционирует за счет того, что к ней по проводам подводится ЭЭ.

Производство ЭЭ осуществляется чаще всего *генераторами переменного тока* (на *электростанциях*). На рис. 1 иллюстрируется принцип действия генератора переменного тока.

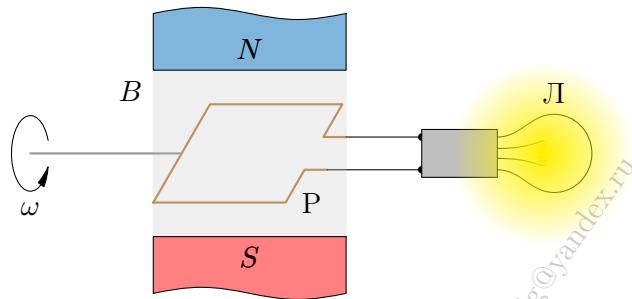


Рис. 1. Схема генератора переменного тока

Проводящая рамка Р, подключенная к лампе Л, вращается с *постоянной* угловой скоростью ω в однородном магнитном поле B как бы между полюсами N и S магнита. Меняющийся магнитный поток через рамку порождает ЭДС индукции в ней, которая вызывает ток в контуре из рамки и лампы. В этом случае ток в рамке и лампе оказывается *синусоидальным*.

Передача ЭЭ потребителям происходит по проводам под *высоким* напряжением — *высоковольтным линиям электропередачи*. То есть напряжение в линии электропередачи (ЛЭП) перед транспортировкой ЭЭ повышают.

При доставке ЭЭ потребителю напряжение в ЛЭП необходимо уменьшить¹. Повышение (перед транспортировкой ЭЭ) или понижение (при доставке ЭЭ) *переменного* напряжения осуществляют с помощью специальных устройств — *трансформаторов*.

Простейший трансформатор состоит из двух обмоток (катушек), навитых на замкнутый стальной сердечник (рис. 2).

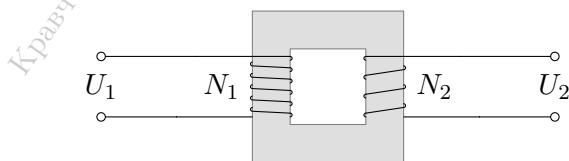


Рис. 2. Трансформатор

На *первичную обмотку* с числом витков N_1 подают напряжение U_1 от источника напряжения. На выводах *вторичной обмотки* с числом витков N_2 (вследствие изменения через нее магнитного потока, созданного переменным током в первичной обмотке) возникает напряжение U_2 . Трансформатор характеризуют *коэффициентом трансформации*, равным $k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$.

¹Потребление электроэнергии на низком напряжении оказывается технически менее сложным и менее опасным, чем на высоком.

46 Электромагнитная волна

Электромагнитная волна — это распространение колебаний электрического и магнитного полей¹.

Источником электромагнитных волн является любой заряд, движущийся с ускорением. На рис. 1 показана структура электромагнитной волны вдали от колеблющегося заряда, излучающего эту волну.

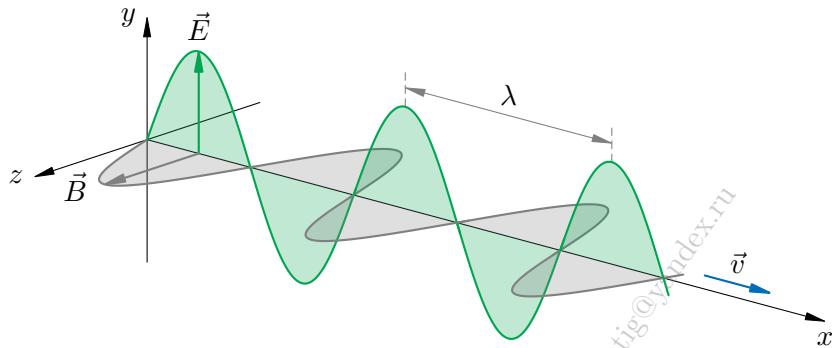


Рис. 1. Электромагнитная волна

Электромагнитная волна, изображенная на рис. 1, излучается зарядом, колеблющимся с частотой ν вдоль оси y около начала координат. Волна распространяется (бежит) со скоростью \vec{v} вдоль оси x . В каждой точке оси x векторы напряженности \vec{E} электрического поля и индукции \vec{B} магнитного поля волны совершают колебания вдоль осей y и z соответственно (в каждой точке оси x векторы \vec{E} и \vec{B} взаимно перпендикулярны²; колебания этих векторов происходят также с частотой ν , называемой *частотой электромагнитной волны*).

Две синусоиды на рис. 1 отражают распределение значений напряженности E и индукции B вдоль оси x в некоторый момент времени. *Длина волны* λ — это расстояние между двумя ближайшими впадинами или горбами (см. рис. 1; $\lambda = vT$, где T — период волны, то есть величина обратная частоте волны).

Электромагнитные волны являются *поперечными* — колебания векторов напряжённости и индукции происходят в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны ($\vec{E} \perp \vec{B} \perp \vec{v}$).

Все электромагнитные волны в зависимости от частоты (или длины волны в вакууме) разделяют на диапазоны.

1. **Радиоволны** ($\nu < 3 \cdot 10^{12}$ Гц).
2. **Инфракрасное излучение** ($3 \cdot 10^{12}$ Гц $< \nu < 4 \cdot 10^{14}$ Гц).
3. **Видимый свет** ($4 \cdot 10^{14}$ Гц $< \nu < 8 \cdot 10^{14}$ Гц).
4. **Ультрафиолетовое излучение** ($8 \cdot 10^{14}$ Гц $< \nu < 6 \cdot 10^{16}$ Гц).
5. **Рентгеновское излучение** ($6 \cdot 10^{16}$ Гц $< \nu < 8 \cdot 10^{19}$ Гц).
6. **Гамма-излучение** ($\nu > 8 \cdot 10^{19}$ Гц).

¹А именно, колебаний *напряженности* электрического поля и *индукции* магнитного поля.

²Кратчайший поворот вектора \vec{E} к вектору \vec{B} всегда совершается против часовой стрелки, если смотреть с конца вектора \vec{v} .