

## Краткий справочник по теме «Электродинамика»

### Электростатика

*1. Электрический заряд. Закон сохранения электрического заряда. Взаимодействие точечных зарядов. Закон Кулона.*

Электрический заряд — скалярная физическая величина, определяющая интенсивность электромагнитного взаимодействия. Обозначается буквой  $q$ , измеряется в кулонах (Кл).

- Если тело имеет *избыточные* (лишние) электроны, то тело заряжено *отрицательно*, если у тела *недостаток* электронов, то тело заряжено *положи-*

тельно. Величина заряда будет равна  $q = N \cdot e$ , где  $N$  — число избыточные или недостающих электронов;  $e$  — элементарный заряд, равный  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

Если заряд тела  $q$  распределить на несколько ( $N$ ) одинаковых тел, то полученные заряды  $q_0$  будут равны между собой, т.е.  $q_0 = \frac{q}{N}$ .

*Точечным зарядом* называют заряженное тело, размерами которого в условиях данной задачи можно пренебречь.

*Электризация* — явление, сопровождающееся перераспределением зарядов на телах.

*Закон сохранения электрического заряда.* В любой замкнутой (электрически изолированной) системе сумма электрических зарядов остается постоянной при любых взаимодействиях внутри нее. Полный электрический заряд ( $q$ ) системы равен алгебраической сумме ее положительных и отрицательных зарядов ( $q_1, q_2, \dots, q_N$ ):  $q = q_1 + q_2 + \dots + q_N$ .

*Взаимодействие заряженных частиц.* Опыт показывает, что *разноименные* электрические заряды *притягиваются* друг к другу, а *одноименные* — *отталкиваются*.

*Закон Кулона.* Сила взаимодействия  $F$  двух точечных неподвижных электрических зарядов в вакууме прямо пропорциональна их величинам  $q_1$  и  $q_2$ , обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними  $r$  и направлена

вдоль прямой, соединяющей эти заряды:  $F = k \cdot \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}$ , где  $k$  — коэффициент пропорциональности, равный  $\frac{1}{4\pi \cdot \epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$ ;  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная, равная  $8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$ .

- Силы электростатического взаимодействия *направлены вдоль линии*, соединяющей взаимодействующие точечные заряды, равны по величине, но противоположны по направлению.
- Закон Кулона применим не только к взаимодействию точечных зарядов, но и к равномерно заряженным телам сферической формы. В этом случае  $r$  — расстояние между центрами сферических поверхностей.

2. *Электростатическое поле. Напряженность электростатического поля. Поле точечного заряда. Однородное электростатическое поле. Графическое изображение электростатических полей.*

*Электрическим полем* называют вид материи, посредством которого осуществляется взаимодействие электрических зарядов. *Электростатическое поле* — поле, созданное неподвижными электрическими зарядами.

*Напряженностью* электрического поля — силовая (векторная) характеристика поля, численно равная силе, действующей на единичный положительный заряд, помещенный в данную точку пространства:  $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$ . Обозначается

буквой  $\vec{E}$ , измеряется в Н/Кл или В/м.

- Направление вектора напряженности в данной точке пространства совпадает с направлением силы, с которой поле действует на *пробный* (положительный) заряд, помещенный в эту точку поля.

Значение *напряженности* электростатического поля, созданного

- *точечным зарядом*, в некоторой точке пространства прямо пропорционально величине этого заряда и обратно пропорционально квадрату расстояния от заряда до данной точки:  $E = k \cdot \frac{|q|}{r^2}$ ;

$$E = k \cdot \frac{|q|}{r^2};$$

- *заряженной сферой*, в некоторой точке пространства прямо пропорционально величине этого заряда и обратно пропорционально квадрату расстояния от центра сферы до данной точки, если расстояние не меньше радиуса сферы. Если расстояние меньше радиуса сферы, то напряженность равна нулю:  $E = k \cdot \frac{|q|}{l^2}$ , если  $l \geq R$ ;  $E = 0$ , если  $l < R$ ,

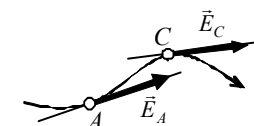
где  $k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$  — коэффициент пропорциональности.

*Принцип суперпозиции для напряженности электростатического поля.* Напряженность электрического поля, создаваемого системой зарядов  $q_1, q_2, \dots, q_N$  в данной точке пространства, равна векторной сумме напряженностей электрических полей  $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \dots, \vec{E}_N$ , создаваемых в той же точке зарядами в отдельности:  $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_N$ .

*Графически* электрическое поле представляют в виде силовых линий. *Силовая линия* — это направленная линия, касательная к которой в каждой точке совпадает с направлением вектора напряженности в этой точке поля. Силовые линии изображают, учитывая следующие их свойства:

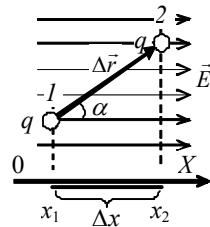
- начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных;
- перпендикулярны поверхности;
- не пересекаются и не имеют изломов;
- там, где силовые линии *гуще*, напряженность *больше*, и наоборот.

*Однородное поле* — это поле, вектор напряженности которого в каждой точке пространства одинаков (по модулю и направлению). Графически однородное поле представляет собой набор параллельных равноотстоящих друг от друга силовых линий.



3. *Потенциальный характер электростатического поля. Потенциал электростатического поля точечного заряда. Разность потенциалов. Напряжение. Связь между напряжением и напряженностью однородного электростатического поля. Принцип суперпозиции электростатических полей.*

*Работа электростатического поля* при перемещении заряда — физическая величина, численно равная произведению этого заряда  $q$ , на значение напряженности электрического поля  $E$  в данной точке поля и на проекцию перемещения заряда на ось, направленную вдоль силовой линии:  $A = q \cdot E \cdot \Delta x$ , где  $\Delta x = x_2 - x_1$  или  $\Delta x = \Delta r \cdot \cos \alpha$  — проекция перемещения заряда на ось, направленную вдоль силовой линии (м);  $x_2$  и  $x_1$  — координаты заряда в конечном и начальном положении соответственно (м);  $\Delta r$  — перемещение заряда (м);  $\alpha$  — угол между направлением перемещения и силовой линией.



*Потенциал электрического поля* в данной точке — скалярная физическая величина, характеризующая потенциальную энергию  $W$  единичного заряда  $q$  в данной точке пространства:  $\varphi = \frac{W_p}{q}$ . Обозначается буквой  $\varphi$ , измеряется в вольтах (В).

Потенциал электростатического поля, созданного *точечным зарядом*  $q$  в точке, отстоящей на расстоянии  $r$  от заряда, равен  $\varphi = \frac{k \cdot q}{r}$ .

- Знак потенциала совпадает со знаком заряда.
- Потенциал точки, находящейся в бесконечности от заряда, создающего поле, равен нулю.

Потенциал электростатического поля, созданного *сферой радиуса*  $R$  и с зарядом  $q$  в точке, отстоящей на расстоянии  $l$  от центра сферы, равен  $\varphi = \frac{k \cdot q}{l}$ ,

если  $l > R$ ;  $\varphi = \frac{k \cdot q}{R}$ , если  $l \leq R$ .

*Принцип суперпозиции* потенциалов. Потенциал поля нескольких точечных зарядов равен алгебраической сумме потенциалов отдельных зарядов:  $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_N$ .

*Разность потенциалов* между двумя точками поля численно равна работе, которое совершается полем при перемещении единичного электрического заряда между этими точками:  $\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q}$ . Обозначается  $\varphi_1 - \varphi_2$ , измеряется в вольтах (В).

*Напряжение* между двумя точками поля равно разности потенциалов между этими точками, если между ними не включен источник тока:  $U = \varphi_1 - \varphi_2$ . Обозначается буквой  $U$ , измеряется в вольтах (В).

*Напряжения и проекция напряженности* однородного электростатического поля связаны следующим соотношением:  $E_x = \frac{U}{x_2 - x_1} = -\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{x_1 - x_2}$ ,  $E_x$  — проекция напряженности на ось  $OX$ , направленную вдоль силовой линии;  $x_1$  и

$x_2$  — координаты точек с потенциалом  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  соответственно.

- Напряженность электростатического поля направлена в сторону убывания потенциала.

*4. Диэлектрики в электростатическом поле. Диэлектрическая проницаемость вещества.*

*Проводниками* называются вещества, по которым могут свободно перемещаться электрические заряды.

*Диэлектриками* называются вещества, в которых практически отсутствуют свободные носители зарядов.

*Диэлектрическая проницаемость среды* — скалярная физическая величина, характеризующая способность диэлектрика поляризоваться под действием электрического поля и равная отношению модуля напряженности  $E_0$  однородного электрического поля в вакууме к модулю напряженности  $E$  электрического поля в однородном диэлектрике, внесенном во внешнее поле:  $\varepsilon = \frac{E_0}{E}$ . Обозначается буквой  $\varepsilon$ .

При расчете кулоновских сил взаимодействия между точечными зарядами, напряженности поля и потенциала точечного заряда внутри диэлектрика необходимо руководствоваться формулами, содержащими диэлектрическую

проницаемость данной среды:  $F = \frac{k \cdot |q_1| \cdot |q_2|}{\varepsilon \cdot r^2}$ ,  $E = \frac{k \cdot |q|}{\varepsilon \cdot r^2}$ ,  $\varphi = \frac{k \cdot q}{\varepsilon \cdot r}$ .

*5. Емкость. Конденсаторы. Энергия электростатического поля конденсатора.*

*Емкость уединенного проводника* определяется отношением заряда  $q$ , сообщенного проводнику, к потенциалу  $\varphi$ , который он при этом приобрел:  $C = \frac{q}{\varphi}$ .

*Емкость двух проводников (конденсатора)* — физическая величина равная отношению заряда  $q$  одного из проводников к напряжению  $U$  между ними:  $C = \frac{q}{U}$ . Обозначается буквой  $C$ , измеряется в фарадах (Ф).

*Конденсатор* — устройство, состоящее из изолированных друг от друга проводников, предназначенное для накопления электрического заряда и энергии. *Плоским* называется конденсатор, состоящий из двух параллельных металлических пластин (обкладок), расположенных на небольшом расстоянии друг от друга и разделенных слоем диэлектрика.

*Емкость плоского конденсатора* прямо пропорциональна площади его обкладок  $S$ , диэлектрической проницаемости вещества  $\varepsilon$  между обкладками и обратно пропорциональна расстоянию между ними  $d$ :  $C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d}$ , где

$\epsilon_0$  — электрическая постоянная, равная  $8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$ .

Энергия электростатического поля конденсатора равна половине произведения его емкости и квадрата напряжения на обкладках:  $W = \frac{C \cdot U^2}{2}$ .

• Так как  $W = \frac{C \cdot U^2}{2}$  и  $C = \frac{q}{U}$ , то энергию заряженного конденсатора можно рассчитать, зная любые две величины из трех:  $C$ ,  $U$ ,  $q$ .

Если конденсатор:

- *отключен* от источника питания, то при изменении емкости конденсатора, заряд конденсатора изменяться не будет, т.е.  $q_1 = q_2$ ;
- *подключен* к источнику питания, то при изменении емкости конденсатора, напряжение на конденсаторе изменяться не будет, т.е.  $U_1 = U_2$ .

### Постоянный ток

*1. Электрический ток. Условия существования электрического тока. Источники электрического тока. Электрическая цепь. Сила и направление электрического тока. Электрическое сопротивление. Удельное сопротивление. Реостаты. Закон Ома для однородного участка электрической цепи.*

Электропроводность — это способность веществ проводить электрический ток. По электропроводности все вещества делятся на проводники, диэлектрики и полупроводники.

Электрическим током называется упорядоченное (направленное) движение заряженных частиц.

Для существования электрического тока в замкнутой электрической цепи необходимо:

- наличие свободных заряженных частиц;
- наличие внешнего электрического поля, силы которого, действуя на заряженные частицы, заставляют их двигаться упорядоченно;
- наличие источника тока, внутри которого сторонние силы перемещают свободные заряды против направления электростатических (кулоновских) сил.

Источники электрического тока — это устройство, способное поддерживать разность потенциалов и обеспечивать упорядоченное движение электрических зарядов во внешней цепи. Источник электрического тока имеет два полюса (две клеммы), к которым присоединяются концы проводника (внешнего участка цепи). В источниках тока происходит превращение энергии

Сила тока  $I$  — скалярная физическая величина, равная отношению заряда  $\Delta q$ , прошедшего через поперечное сечение проводника за промежуток времени  $\Delta t$ , к этому промежутку:  $I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$ . Обозначается буквой  $I$ , измеряется в амперах (А).

- За *направление* тока принято направление движения по проводнику положительно заряженных частиц. В замкнутой цепи электрический ток направлен от положительного полюса (+) источника к отрицательному (—).

Сила тока в проводнике равна  $I = q \cdot n \cdot S \cdot \langle v_d \rangle$ , где  $q$  – заряд одной свободной частицы (для металлов  $q = e \approx 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл),  $n$  – концентрация свободных заряженных частиц ( $\text{м}^{-3}$ ),  $S$  – площадь поперечного сечения проводника ( $\text{м}^2$ ),  $\langle v_d \rangle$  – средняя скорость упорядоченного движения (скорость дрейфа) свободных зарядов ( $\text{м/с}$ ).

*Электрическое сопротивление* – величина, характеризующая способность проводника противодействовать прохождению электрического тока. Она равна отношению разности потенциалов ( $\varphi_1 - \varphi_2$ ) между концами данного проводника к силе тока  $I$  в нем:  $R = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{I}$ . Обозначается буквой  $R$ , измеряется в омах (Ом). Сопротивление проводника зависит от его материала (вещества), геометрических размеров и температуры.

Сопротивление однородного проводника цилиндрической формы длиной  $l$  постоянного поперечного сечения  $S$  определяется по формуле  $R = \rho \cdot \frac{l}{S}$ , где  $\rho$  — удельное сопротивление проводника, табличная величина.

Удельное сопротивление проводника – скалярная физическая величина, численно равная сопротивлению однородного цилиндрического проводника, изготовленного из данного материала и имеющего единичную длину и единичную площадь поперечного сечения  $\left( \rho = R \cdot \frac{S}{l} \right)$ . Обозначается буквой  $\rho$ , измеряется в Ом·м.

- Если площадь поперечного сечения проводника измеряют в  $\text{мм}^2$ , то можно —  $[\rho] = \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ .

Удельное сопротивление металлов с уменьшением температуры уменьшается. При температурах близких к  $-273^\circ\text{C}$  (абсолютный нуль) наблюдается явление *сверхпроводимости*. Оно заключается в том, что при температуре ниже некоторой критической  $t_k$  (называемой температурой перехода в сверхпроводящее состояние), удельное сопротивление проводника скачком падает до нуля.

Всякий проводник, обладающий достаточно большим сопротивлением будем называть *резистором*. *Реостат* — это прибор, рабочее сопротивление которого можно изменять за счет длины включаемого в цепь проводника.

Сочетание источника тока, нагрузки и соединительных проводов называют *электрической цепью*. Обычно в цепи используют еще и выключатель (ключ).

*Закон Ома для однородного участка цепи*. Сила тока  $I$  на однородном участке цепи прямо пропорциональна напряжению  $U$  на конца этого участка и обратно пропорциональна его сопротивлению  $R$ :  $I = \frac{U}{R}$ .

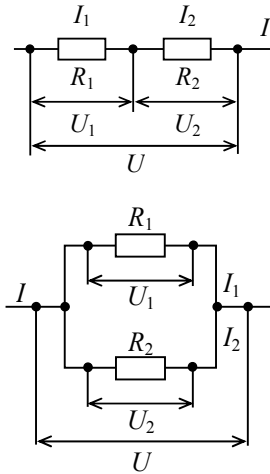
## 2. Последовательное и параллельное соединение проводников.

Закономерности *последовательного* соединения резисторов:

- $I = I_1 = I_2 = \dots = I_N$ ;  $U = U_1 + U_2 + \dots + U_N$ ;  
 $R = R_1 + R_2 + \dots + R_N$ ;
- если  $R_1 = R_2 = \dots = R_N$ , то  $R = N \cdot R_1$ ,  
 $U = N \cdot U_1$ .

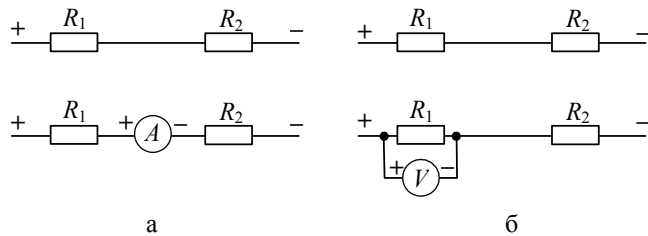
Закономерности *параллельного* соединения резисторов:

- $I = I_1 + I_2 + \dots + I_N$ ;  $U = U_1 = U_2 = \dots = U_N$ ;
- $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_N}$ ;
- если  $R_1 = R_2 = \dots = R_N$ , то  $R = \frac{R_1}{N}$ ,  $I = N \cdot I_1$ .



Для измерения в проводнике  $R_1$  силы тока применяют *амперметр*, который включают последовательно с этим проводником (рис. а). Поскольку включение амперметра в электрическую цепь не должно сильно изменять силу тока в ней, то сопротивление амперметра должно быть как можно меньше. У *идеальных амперметров* сопротивление равно нулю.

Для измерения на проводнике  $R_1$  напряжения применяют *вольтметр*, который включают параллельно этому проводнику (рис. б). Чтобы подключение вольтметра существенно не изменяло силу тока и распределение напряжений на участке цепи, его сопротивление должно быть как можно большим.



- При включении этих приборов необходимо соблюдать полярность.

## 3. Работа и мощность электрического тока. Закон Джоуля-Ленца. Электродвижущая сила источника тока. Закон Ома для полной электрической цепи. Коэффициент полезного действия источника тока.

Работа тока на участке цепи равна произведению силы тока  $I$ , напряжения  $U$  на этом участке и времени  $\Delta t$ , в течении которого ток проходил по проводнику:  $A = U \cdot I \cdot \Delta t$ .

- С учетом закона Ома для участка цепи  $I = \frac{U}{R}$ , работа тока:



$$A = I^2 \cdot R \cdot \Delta t \text{ или } A = \frac{U^2}{R} \cdot \Delta t, \text{ где } R \text{ — сопротивление участка (Ом)}.$$

Прохождение тока через проводник, обладающий сопротивлением, всегда сопровождается *выделением теплоты*. Если на участке цепи не совершается механическая работа и ток не производит химического или иного действия, то  $A = Q$ , где  $Q$  — количество теплоты, выделяемое проводником с током (Дж).

*Закон Джоуля-Ленца*. Количество теплоты, выделяемое проводником с током, равно произведению квадрата силы тока  $I$ , сопротивления  $R$  и времени  $\Delta t$  прохождения тока по проводнику:  $Q = I^2 \cdot R \cdot \Delta t$ .

*Мощность тока* в нагрузке равна работе, которая совершается током за единицу времени:  $P = \frac{A}{\Delta t}$ , где  $\Delta t$  — время прохождения тока. Обозначается буквой  $P$ , измеряется в ваттах (Вт).

• Так как  $A = U \cdot I \cdot \Delta t$ , а  $I = \frac{U}{R}$ , то мощность тока можно также найти, если известны любые две величины из трех:  $I$ ,  $U$ ,  $R$ :

$$P = U \cdot I, P = I^2 \cdot R \text{ или } P = \frac{U^2}{R}.$$

В источнике тока следует непрерывно разделять электрические заряды противоположных знаков, которые под действием сил Кулона стремятся соединиться. Для этой цели необходимы силы иной природы.

*Сторонние силы* — это силы неэлектростатической природы (отличные от кулоновских), действующие на свободные заряды.

*Электродвижущая сила* (ЭДС) — скалярная физическая величина, численно равна работе сторонних сил  $A_{\text{ст}}$  по перемещению единичного положительного (пробного) заряда по замкнутой цепи:  $\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}$ , где  $q$  — величина перемещаемого заряда. Обозначается буквой  $\mathcal{E}$  (ЭДС), измеряется в вольтах (В).

*Закон Ома для полной цепи*. Сила тока  $I$  в полной цепи прямо пропорциональна ЭДС  $\mathcal{E}$  источника тока и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи  $R_0$ :  $I = \frac{\mathcal{E}}{R_0} = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$ , где  $R$  — внешнее сопротивление цепи;  $r$  — сопротивление источника.

Мощность, выделяемая на внешнем участке цепи, называется *полезной мощностью*. Она равна  $P_{\text{пол}} = I^2 \cdot R$ .

Мощность, выделяемая на внутреннем сопротивлении источника, называется *теряемой мощностью*. Она равна  $P_{\text{тер}} = I^2 \cdot r$ .

*Полная мощность* источника тока равна  $P = P_{\text{пол}} + P_{\text{тер}}$  или  $P = I \cdot \mathcal{E}$ .

*Коэффициент полезного действия* (КПД) источника тока определяется как отношение полезной мощности к полной:  $\eta = \frac{P_{\text{пол}}}{P} \cdot 100\% = \frac{R}{R + r} \cdot 100\%$ , где  $R$  — внешнее сопротивление цепи;  $r$  — сопротивление источника тока.

4. *Электрический ток в металлах, электролитах, полупроводниках, газах и вакууме.*

*Электрический ток в металлах* – направление (упорядоченное) движение свободных электронов.

*Газы* в естественном состоянии не проводят электричества. Проводниками могут быть только ионизированные газы, в которых содержатся электроны, положительные и отрицательные ионы. *Ионизация* – процесс присоединения (захвата) или отделения (отрыва) электронов от нейтральных атомов и молекул. Явление прохождения электрического тока через газ называется *газовым разрядом*.

*Плазма* – агрегатное состояние вещества, характеризующееся высокой степенью ионизации его частиц, причем концентрации положительно и отрицательно заряженных частиц приблизительно равны.

*Вакуум* – состояние газа при давлении меньше атмосферного. Поскольку в вакууме нет свободных носителей заряда, то он является идеальным диэлектриком. Для того чтобы в вакууме мог проходить электрический ток, в нем, при помощи термоэлектронной эмиссии, «создают» некоторую концентрацию свободных электронов. *Термоэлектронной эмиссией* называется испускание электронов вещества при его нагревании.

Для того чтобы жидкость проводила электрический ток, необходимо, чтобы произошла *электролитическая диссоциация*, т.е. распад молекул вещества на ионы при растворении его в жидкости. Раствор при этом называют *электролитом*. *Электрическим током в жидкости* называется направленное движение ионов под действием приложенного электрического поля. Прохождение тока через электролит сопровождается химическими реакциями на электродах, что приводит к выделению на них химических элементов, входящих в состав электролита. Это явление получило название *электролиза*.

*Электрический ток в полупроводниках* – это направленное движение электронов из зоны проводимости и дырок из валентной зоны. Такая проводимость полупроводника называется *собственной*. Добавка специальных примесей создает проводимость преимущественно электронного или дырочного типа. Полупроводники получили название *p*-типа в случае дырочной проводимости и *n*-типа – в случае электронной.

### Магнитное поле. Электромагнитная индукция

1. *Постоянные магниты. Взаимодействие магнитов. Магнитное поле. Индукция магнитного поля. Графическое изображение магнитных полей. Принцип суперпозиции магнитных полей.*

Уже в VI в. До н. э. было известно, что некоторые руды обладают способностью притягиваться друг к другу и притягивать на расстоянии железные предметы. Они получили названия *магнитов* (естественных магнитов). Магниты имеют два полюса — северный и южный. Одноименные магнитные полюсы *отталкиваются*, разноименные — *притягиваются*.

Вокруг любого магнита существует *магнитное поле*. Действие одного

магнита на другой можно рассматривать как результат взаимодействия одного магнита с магнитным полем другого.

Силовой характеристикой магнитного поля в каждой точке пространства является *вектор индукции магнитного поля*  $\vec{B}$ . Модуль индукции магнитного поля определяется как отношение максимальной магнитной силы  $F_{\max}$ , действующей на проводник с током единичной длины, к силе тока  $I$ :  $B = \frac{F_{\max}}{l \cdot I}$ , где  $l$  — длина проводника. Обозначается буквой  $B$ , измеряется в теслах (Тл).

Индукция магнитного поля:

- бесконечного прямолинейного проводника с током в данной точке поля  $B_{\text{пр}} = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi \cdot l}$ , где  $l$  — расстояние от проводника до данной точки;
- в центре кругового тока (кольца)  $B_{\text{кр}} = \frac{\mu_0 \cdot I}{2r}$ , где  $r$  — радиус кольца с током;
- внутри (середине) цилиндрической катушки (соленоида)  $B_{\text{с}} = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot N}{l}$ , где  $N$  — число витков катушки;  $l$  — длина катушки;  $\mu_0$  — магнитная постоянная, равная  $4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}}{\text{А}}$ ;  $I$  — сила тока.

Для магнитного поля выполняется *принцип суперпозиции*: если магнитное поле в данной точке пространства создается несколькими проводниками с током, то индукция  $\vec{B}$  результирующего поля есть векторная сумма индукций полей  $\vec{B}_1, \vec{B}_2, \dots, \vec{B}_n$ , создаваемых каждым проводником с током в отдельности:  $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n$ .

За *направление* вектора магнитной индукции принимают следующие направления:

- для *магнитной стрелки* (свободно вращающейся в магнитном поле) — от южного ( $S$ ) полюса стрелки к северному ( $N$ ) (рис. 1 а);
- для *плоского магнита*: вдоль магнита — от южного ( $S$ ) полюса магнита к северному ( $N$ ) (рис. 1 б), по бокам магнита — от северного ( $N$ ) полюса магнита к южному ( $S$ ) (рис. 1 в — пунктиром показаны линии индукции);

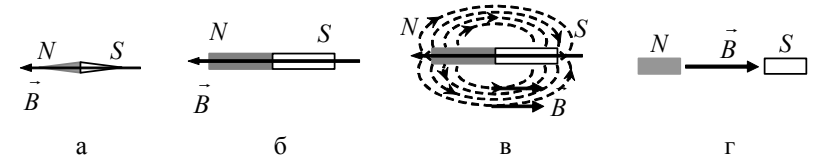


Рис. 1.

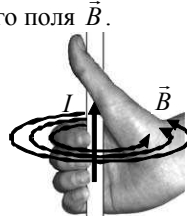
- между *полюсами магнитов* (подковообразного магнита) — от северного ( $N$ ) полюса магнита к южному ( $S$ ) (рис. 1 г).

Графически магнитные поля изображаются с помощью специальных линий, называемых *линиями индукции магнитного поля*. Касательная к любой

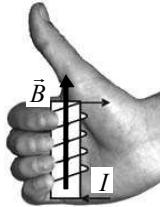
линии в каждой точке направлена вдоль индукции магнитного поля  $\vec{B}$ .

Для определения направления вектора магнитной индукции проводника с током применяют *правило буравчика* или *правило правой руки*:

а) для *прямого проводника* с током правило правой руки имеет следующий вид: большой палец правой руки, отставленный на  $90^\circ$ , направляем по току, тогда четыре согнутых пальца, обхватывающие проводник, укажут направление вектора магнитной индукции.



б) для *витка* (катушки) с током правило правой руки имеет следующий вид: четыре согнутых пальца правой руки, обхватывающей виток (катушку), направляем по току, тогда большой палец, отставленный на  $90^\circ$ , укажет направление вектора магнитной индукции в центре витка (рис. б).



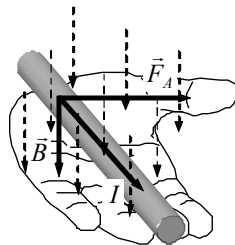
от нас к нам

Для изображения векторов, перпендикулярных плоскости рисунка применяют условные обозначения.

## 2. Взаимодействие проводников с током. Закон Ампера. Сила Лоренца. Движение заряженных частиц в магнитном поле.

*Сила Ампера* – это сила, с которой магнитное поле действует на отдельный участок проводника с током.

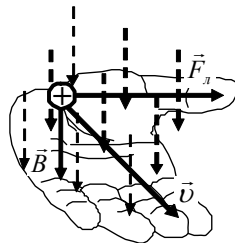
*Закон Ампера.* Модуль силы, с которой магнитное поле действует на находящийся в нем прямолинейный проводник с током, равен произведению индукции  $B$  этого поля, силы тока  $I$ , длины участка проводника  $l$  и синуса угла  $\alpha$  между направлениями тока и индукции магнитного поля:  $F_A = I \cdot B \cdot l \cdot \sin \alpha$ .



Для определения направления силы Ампера применяют *правило левой руки*: если ладонь левой руки расположить так, чтобы перпендикулярная составляющая к проводнику вектора индукции ( $\vec{B}$ ) входила в ладонь, а четыре вытянутых пальца указывали бы направление тока ( $I$ ), то отогнутый на  $90^\circ$  большой палец укажет направление силы Ампера ( $\vec{F}_A$ ).

*Сила Лоренца* – это сила, с которой магнитное поле действует на движущийся заряд. Она равна  $F_L = q \cdot B \cdot v \cdot \sin \alpha$ , где  $F_L$  – сила Лоренца (Н);  $q$  – модуль заряда движущейся частицы;  $v$  – скорость частицы;  $B$  – модуль вектора индукции магнитного поля (Тл);  $\alpha$  – угол между скоростью движения положительного заряда и вектором магнитной индукции.

Для определения направления силы Лоренца применяют *правило левой руки*: если левую руку расположить так, чтобы перпендикулярная составляющая к скорости частицы ( $\vec{v}$ ) магнитной индукции ( $\vec{B}$ ) входила в ладонь, а четыре вытянутых пальца указы-



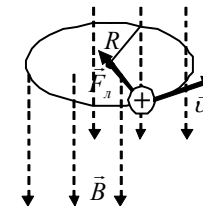
вали бы направления движения *положительно заряженной частицы*, то отогнутый на  $90^\circ$  большой палец укажет направление силы Лоренца ( $\vec{F}_L$ ), действующей со стороны магнитного поля на частицу. Для *отрицательной частицы* направление силы будет противоположным по отношению к положительной частице.

1. Если скорость  $v$  заряженной частицы массой  $m$  направлена *вдоль* вектора магнитной индукции поля, то частица будет двигаться равномерно прямолинейно (сила Лоренца  $F_L = 0$ , т.к.  $\alpha = 0^\circ$ ).

2. Если скорость  $v$  заряженной частицы массой  $m$  *перпендикулярна* вектору индукции магнитного поля, то частица будет двигаться по окружности радиуса  $R$ , плоскость которой перпендикулярна линиям магнитной индукции.

Для расчета характеристик движения заряженной частицы можно применять следующие формулы:

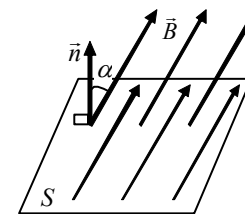
$m \cdot a_{\text{ц}} = F_L$  (2-ой закон Ньютона), где  $a_{\text{ц}} = \frac{v^2}{R}$ ;  $F_L = q \cdot B \cdot v \cdot \sin \alpha = q \cdot B \cdot v$ , т.к.  $\alpha = 90^\circ$  (скорость частицы перпендикулярна вектору магнитной индукции). Тогда  $\frac{m \cdot v^2}{R} = q \cdot v \cdot B$ . Напоминаю, что период вращения равен  $T = \frac{2\pi \cdot R}{v}$ , где  $R$  — радиус окружности;  $v$  — скорость частицы.



3. *Магнитный поток. Явление электромагнитной индукции. Вихревое электрическое поле. Закон электромагнитной индукции. Правило Ленца.*

Для характеристики числа линий индукции магнитного поля, пронизывающих некоторую площадь, вводится физическая скалярная величина, называемая *магнитным потоком* и обозначаемая греческой буквой  $\Phi$ .

*Магнитный поток*  $\Phi$  однородного поля через плоскую поверхность равен произведению модуля индукции  $B$  магнитного поля, площади поверхности  $S$  и косинуса угла  $\alpha$  между вектором  $\vec{B}$  и нормалью  $\vec{n}$  (перпендикуляром) к поверхности:  $\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha$ . Магнитный поток обозначается греческой буквой  $\Phi$  и измеряется в веберах (Вб).



*Электромагнитная индукция* — это явление возникновения ЭДС индукции при изменении магнитного потока через площадь, ограниченную контуром.

При электромагнитной индукции возникает *вихревое электрическое поле*, которое и заставляет двигаться заряженные частицы (электроны) в проводнике, т.е. создает индукционный ток. В отличие от электростатического вихревое электрическое поле имеет замкнутые линии индукции магнитного поля.

*Закон электромагнитной индукции.* ЭДС электромагнитной индукции  $\mathcal{E}_i$

в замкнутом контуре равна скорости изменения пронизывающего его магнитного потока, взятого с противоположным знаком:  $\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ , где  $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$

— изменение магнитного потока от  $\Phi_1$  до  $\Phi_2$ ;  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  — скорость изменения магнитного потока (Вб/с или В).

- Эту формулу можно применять только при *равномерном изменении* магнитного потока.
- Магнитный поток внутри катушки, состоящей из  $N$  витков, равен сумме магнитных потоков, создаваемых каждым витком, т.е.  $\Phi = N \cdot \Phi_1$ .

*Правило Ленца.* Возникающий в замкнутом контуре индукционный ток имеет такое направление, при котором созданный им собственный магнитный поток через площадь, ограниченную контуром, стремится компенсировать изменение внешнего магнитного потока, вызвавшее данный ток.

При движении проводника длиной  $l$  со скоростью  $v$  в постоянном магнитном поле индукцией  $B$  в нем возникает ЭДС индукции  $\mathcal{E}_i = v \cdot B \cdot l \cdot \sin \alpha$ , где  $\alpha$  — угол между направлением скорости движения проводника и вектором индукции магнитного поля.

Индукционный ток в проводниках, движущихся в магнитном поле, возникает за счет действия на свободные заряды проводника силы Лоренца. Поэтому направление индукционного тока в проводнике будет совпадать с направлением составляющей силы Лоренца на этот проводник.

#### 4. Явление самоиндукции. Индуктивность. Энергия магнитного поля.

*Самоиндукция* — это явление возникновения в контуре ЭДС индукции, создаваемой вследствие изменения силы тока в самом контуре.

*Индуктивность* — скалярная физическая величина, численно равная собственному магнитному потоку  $\Phi$ , пронизывающему контур, при силе тока  $I$  в контуре 1 А:  $L = \frac{\Phi}{I}$ . Обозначается индуктивность буквой  $L$ , измеряется в генри (Гн).

ЭДС самоиндукции  $\mathcal{E}_{is} = -L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$ , где  $L$  — индуктивность катушки (Гн);

$\frac{\Delta I}{\Delta t}$  — скорость изменения силы тока (А/с);  $\Delta I = I_2 - I_1$  — изменение силы тока от  $I_1$  до  $I_2$ ;  $\Delta t$  — время изменения силы тока.

- Эту формулу можно применять только при *равномерном изменении* силы тока.

Индуктивность катушки (соленоида)  $L$  длиной  $l$  и площадью поперечного сечения  $S$ , содержащего  $N$  витков, в вакууме определяется по формуле

$$L = \mu_0 \cdot N^2 \cdot \frac{S}{l}, \text{ где } \mu_0 \text{ — магнитная постоянная, равная } 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}.$$

Энергию магнитного поля контура с током  $I$  можно определить по фор-

муле  $W_m = \frac{L \cdot I^2}{2}$ , где  $L$  — индуктивность контура (катушки) (Гн).

- Так как  $W_m = \frac{L \cdot I^2}{2}$  и  $\Phi = L \cdot I$ , то энергию магнитного поля тока (катушки) можно рассчитать, зная любые две величины из трех:  $\Phi$ ,  $L$ ,  $I$ :

$$W_m = \frac{L \cdot I^2}{2} = \frac{\Phi \cdot I}{2} = \frac{\Phi^2}{2L}.$$