



# **Виртуальный курс физики**

## **Электричество и магнетизм**

**Лекция 11. Магнитное поле.  
Электромагнитная индукция**

---

**ТЕОРИЯ, ЗАДАЧИ, ПОДГОТОВКА К ЕГЭ**



**Уважаемые друзья!**

**Вы выбрали Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I и поступили, несомненно, правильно!**

**Наш университет основан в 1809 году. Это старейший инженерный транспортный вуз России. Это "особенный институт" - так в манифесте назвал его Император Александр I.**

**Для того, чтобы успешно пройти вступительные испытания и стать студентом одного из лучших технических вузов России, необходимо иметь высокую подготовку по физике.**

**Как правило, уровень подготовки выпускников школ не всегда соответствует требованиям, предъявляемым к поступающим в высшие учебные заведения. Повысить этот уровень и качественно подготовиться к вступительным испытаниям по физике в технический университет помогут преподаватели факультета довузовской подготовки.**

**Факультет довузовской подготовки организует и проводит курсы по подготовке к поступлению в вуз по программам, соответствующим требованиям ЕГЭ.**

**Занятия проводятся по очной и заочной формам обучения. Занятия по очной форме обучения проводятся в дневное время - с 16.25 (тел. [457-84-04](tel:457-84-04)), и в вечернее время - с 18.00 (тел. [457-87-83](tel:457-87-83)). Мы с удовольствием ответим на все Ваши вопросы.**

**Факультет довузовской подготовки**

***Курс дистанционного обучения по физике  
изложен в авторской редакции доцента  
Петербургского государственного университе-  
та путей сообщения Императора Александра I  
Кытина Юрия Александровича***

# Электричество и магнетизм

## Магнитное поле. Электромагнитная индукция

### Лекция 11

*Тема: Магнитное взаимодействие токов. Магнитное поле. Индуктивность магнитного поля. Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле. Закон Ампера. Действие магнитного поля на движущийся заряд. Сила Лоренца. Поток магнитной индукции. Электромагнитная индукция. Закон электромагнитной индукции. Правило Ленца. Индуктивность контура. Самоиндукция.*

#### 11.1. Магнитное взаимодействие токов. Магнитное поле. Индуктивность магнитного поля

Опыт показывает, что между двумя бесконечно длинными параллельными проводниками с током возникают силы взаимодействия – проводники с одинаковым направлением токов притягиваются, а с противоположным – отталкиваются. Причиной такого взаимодействия является магнитное поле.

*Магнитным полем* называется часть электромагнитного поля, создаваемая проводниками с токами, движущимися заряженными частицами и телами, постоянными магнитами и переменным электрическим полем.

Магнитное поле оказывает силовое воздействие на проводники с током, движущиеся заряженные частицы, рамки с током, магнитные стрелки.

Силовой характеристикой магнитного поля является *вектор магнитной индукции (магнитная индукция)  $\mathbf{B}$* .

Магнитное поле, магнитная индукция которого во всех точках одинакова ( $\mathbf{B} = \text{const}$ ), называется *однородным* полем.

Графически магнитное поле изображается с помощью силовых линий (линии магнитной индукции).

*Линией магнитной индукции* называется воображаемая линия, касательные к которой в каждой точке поля совпадают с вектором  $\mathbf{B}$  в этих точках. Помещенная в магнитное поле магнитная стрелка будет располагаться таким образом, что касательная к силовой линии в точке расположения стрелки совпадает с направлением силы  $\mathbf{F}$ , действующей со стороны магнитного поля на северный конец стрелки (рис. 11.1).

Силовые линии магнитного поля в отличие от линий напряженности электрического поля замкнуты.

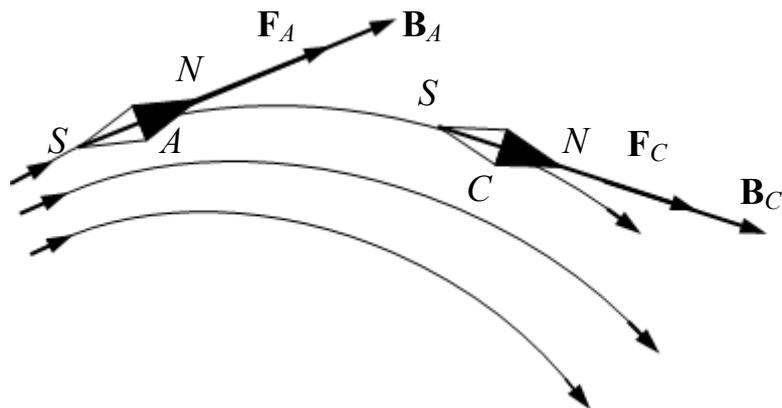


Рис. 11.1

Силловые линии магнитного поля прямого тока (рис. 11.2) представляют собою концентрические окружности, расположенные в плоскостях, перпендикулярных проводнику, центры которых находятся на проводнике с током.

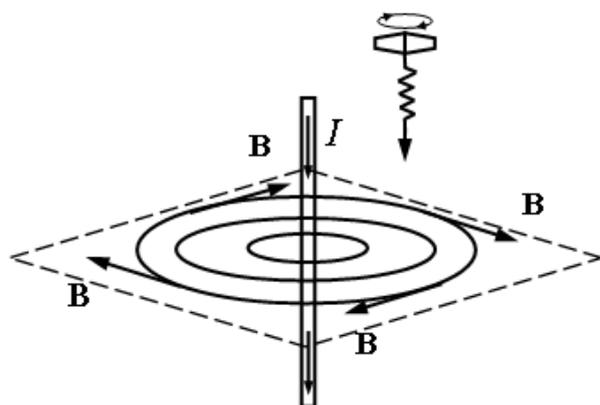


Рис. 11.2

Направление вектора индукции  $\mathbf{B}$  определяется по правилу правого винта (*правило буравчика*): если буравчик с правой резьбой ввинчивать по направлению тока, то направление движения его рукоятки совпадет с направлением вектора индукции  $\mathbf{B}$ .

Если магнитное поле создается витком с током или соленоидом (рис.11.3), правило буравчика применяется следующим образом: если рукоятку буравчика с правой резьбой вращать по направлению тока, идущего по витку, то направление движения острия буравчика будет совпадать с направлением вектора индукции  $\mathbf{B}$ .

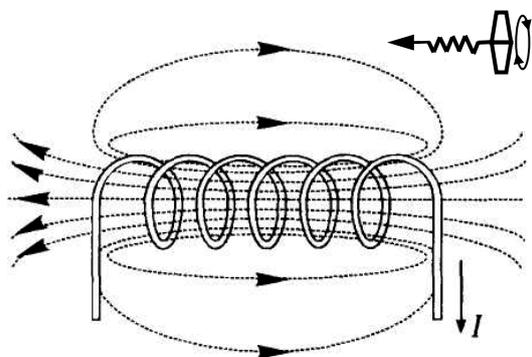


Рис. 11.3

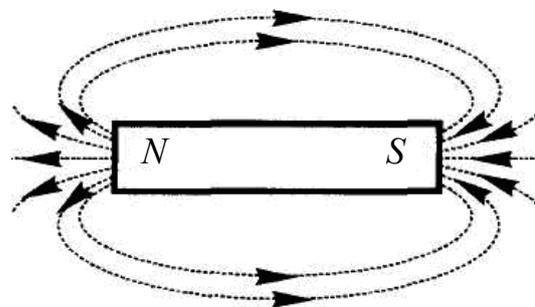


Рис. 11.4

Магнитное поле соленоида подобно магнитному полю полосового постоянного магнита (рис. 11.4). Конец катушки, из которого выходят магнитные силовые линии, подобен северному полюсу  $N$  постоянного магнита. Другой конец, в который магнитные силовые линии входят, подобен южному полюсу  $S$ .



Рис. 11.5

Определить, какой конец катушки соответствует тому или иному полюсу, можно с помощью правила буравчика: северным полюсом  $N$  будет тот конец катушки, на который должен смотреть наблюдатель, чтобы ток в витках протекал против часовой стрелки, тогда противоположный конец соленоида будет соответствовать южному полюсу  $S$  (рис. 11.5).

## 11.2. Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле. Закон Ампера

Опыт показывает, что если проводник с током поместить в магнитное поле, то со стороны поля на него будет действовать сила. Значение этой силы определяется *законом Ампера*: на отрезок прямого проводника с током силой  $I$  и длиной  $l$ , помещенного в однородное магнитное поле с индукцией  $\mathbf{B}$ , действует сила  $\mathbf{F}_A$ , равная

$$F_A = IlB \sin \alpha,$$

где  $\alpha$  – угол между направлением тока и вектором индукции  $\mathbf{B}$  (рис. 11.6).

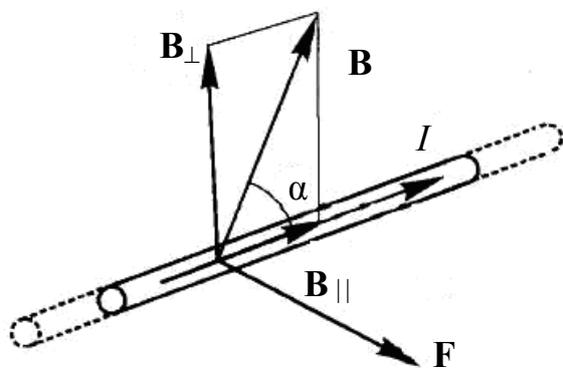


Рис.11.6

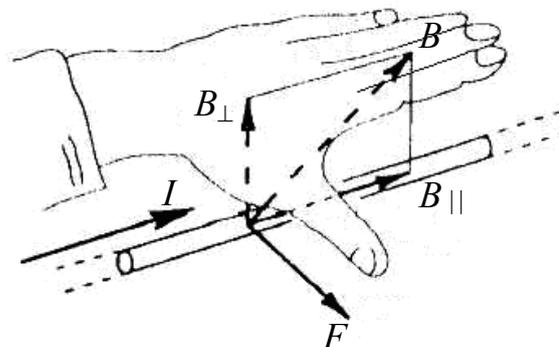


Рис.11.7

Направление силы Ампера  $F_A$  определяется по *правилу левой руки*: если ладонь левой руки расположить так, чтобы нормальная составляющая вектора индукции  $B_{\perp}$  входила в ладонь, а вытянутые пальцы направить по току, то отогнутый на  $90^\circ$  большой палец укажет направление силы Ампера (рис. 11.7).

С помощью закона Ампера модуль вектора индукции в данной точке магнитного поля определяется как максимальная сила Ампера  $F_A^{\max}$ , действующая на проводник единичной длины, по которому течет ток единичный силы:

$$B = \frac{F_A^{\max}}{I}.$$

Максимальная сила достигается тогда, когда проводник расположен перпендикулярно к линиям магнитной индукции.

Таким образом, физический смысл магнитной индукции  $B$  заключается в следующем: магнитная индукция поля в данной точке численно равна силе, действующей со стороны поля на проводник единичной длины с единичной силой тока, расположенный перпендикулярно силовым линиям поля.

Единицей измерения индукции служит тесла (Тл):  $1 \text{ Тл} = 1 \text{ Н} / 1 \text{ м} \cdot 1 \text{ А}$ .

### 11.3. Действие магнитного поля на движущийся заряд. Сила Лоренца

На заряженную частицу, движущуюся со скоростью  $v$  под углом  $\alpha$  к силовым линиям однородного магнитного поля с индукцией  $B$ , со стороны поля действует сила

$$F_{\text{Л}} = qvB \sin \alpha.$$

Эта сила называется *силой Лоренца*. Сила  $F_{\text{Л}}$  перпендикулярна векторам  $B$  и  $v$ , а ее направление определяется *по правилу левой руки*: левую руку необходимо расположить так, чтобы нормальная составляющая вектора  $B_{\perp}$  магнитной индукции входила в ладонь, а вытянутые пальцы были расположены в направлении движения положительного заряда, тогда отогнутый на  $90^\circ$  большой палец покажет направление силы Лоренца.

Если заряженная частица влетает в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям индукции, сила Лоренца в этом случае является центростремительной силой. Она искривляет траекторию движения, и частица движется в плоскости, перпендикулярной вектору  $B$ , по окружности с постоянным радиусом  $R$ :

$$R = \frac{mv}{qB},$$

где  $m$  – масса частицы;  $q$  – заряд частицы;  $v$  – скорость ее движения.

Время движения заряженной частицы по окружности (период обращения)

$$T = 2\pi \frac{m}{Bq}.$$

На заряженную частицу, движущуюся одновременно в однородных магнитном и электрическом полях, действует сила, которую иногда называют *обобщенной силой Лоренца*:

$$F_{\text{Л}} = qE + qvB \sin \alpha,$$

где  $E$  – напряженность электрического поля.

Направление силы Лоренца  $F_{\text{Л}}$  зависит от взаимного направления векторов  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{E}$ .

#### 11.4. Поток магнитной индукции

*Потоком магнитной индукции*  $\Phi$  однородного магнитного поля через плоскую поверхность площадью  $S$  называется физическая величина, равная произведению модуля вектора магнитной индукции  $B$ , площади поверхности  $S$  и косинуса угла  $\alpha$  между вектором  $\mathbf{B}$  и нормалью  $\mathbf{n}$  к поверхности (рис. 11.8):

$$\Phi = BS \cos \alpha.$$

Если силовые линии однородного магнитного поля перпендикулярны плоскости, то

$$\Phi = BS.$$

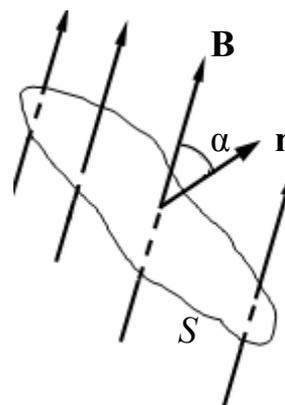


Рис. 11.8

В системе СИ за единицу магнитного потока принимается 1 вебер (Вб):  $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2$ .

#### 11.5. Электромагнитная индукция. Закон электромагнитной индукции. Правило Ленца

Опыт показывает, что если проводящий контур находится в магнитном поле с переменным магнитным потоком, то в этом контуре возникает электрический ток. Такое явление называется *электромагнитной индукцией*. Ток, возникающий в контуре, называется *индукционным током*, а соответствующая этому току электродвижущая сила  $\varepsilon_i$  – *электродвижущей силой электромагнитной индукции*.

Значение  $\varepsilon_i$  определяется *законом электромагнитной индукции*: электродвижущая сила электромагнитной индукции  $\varepsilon_i$  в замкнутом проводящем контуре равна по модулю и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока сквозь площадку, ограниченную этим контуром:

$$\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t},$$

где  $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$  – изменение магнитного потока за промежуток времени  $\Delta t$ .

Если сопротивление контура равно  $R$ , то сила индукционного тока  $I_i$  в контуре

$$I_i = \frac{\varepsilon_i}{R}.$$

Так как  $\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ , имеем

$$I_i = -\frac{\Delta\Phi}{R\Delta t}, \text{ или } I_i\Delta t = -\frac{\Delta\Phi}{R}.$$

В этом выражении  $I_i\Delta t = q$ , где  $q$  – заряд, прошедший через сечение проводника, и, следовательно,

$$q = -\frac{\Delta\Phi}{R}.$$

Если контур представляет собой  $N$  последовательно соединенных витков (например, соленоид), то

$$\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} N.$$

Знак « $-$ » в формуле для ЭДС и силы индукционного тока выражает *правило Ленца*: индукционный ток всегда имеет направление, при котором его магнитное поле противодействует изменению магнитного потока, вызывающего индукционный ток.

Если  $\Delta\Phi/\Delta t > 0$  (магнитный поток, пронизывающий контур, возрастает),  $\varepsilon_i < 0$ , при  $\Delta\Phi/\Delta t < 0$  (магнитный поток, пронизывающий контур, убывает)  $\varepsilon_i > 0$ .

Изменение магнитного потока может быть вызвано движением проводника в магнитном поле или изменением индукции  $\mathbf{B}$  поля. В случае если отрезок проводника длиной  $l$  движется в однородном магнитном поле с индукцией  $\mathbf{B}$  и пересекает его силовые линии со скоростью  $\mathbf{v}$ , то возникновение ЭДС электромагнитной индукции объясняется следующим образом. Вместе с проводником, движущимся в магнитном поле со

скоростью  $\mathbf{v}$ , с такой же скоростью перемещаются и свободные электроны проводника. На движущиеся в магнитном поле заряженные частицы (электроны) действует сила Лоренца  $\mathbf{F}_L$ , перпендикулярная скорости  $\mathbf{v}$  и индукции поля  $\mathbf{B}$  (рис. 11.9)

Под действием силы Лоренца свободные электроны в металлическом проводнике перемещаются к одному из концов проводника. В результате на конце  $A$  появляется избыточный отрицательный заряд, а на конце  $C$  – положительный, что приводит к возникновению разности потенциалов на концах проводника. Эта разность потенциалов и есть ЭДС индукции:

$$\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t},$$

где  $\Delta\Phi$  – поток магнитной индукции через площадку, ограниченную проводником длиной  $l$  за время  $\Delta t$  (рис. 11.9, заштрихованная площадка).

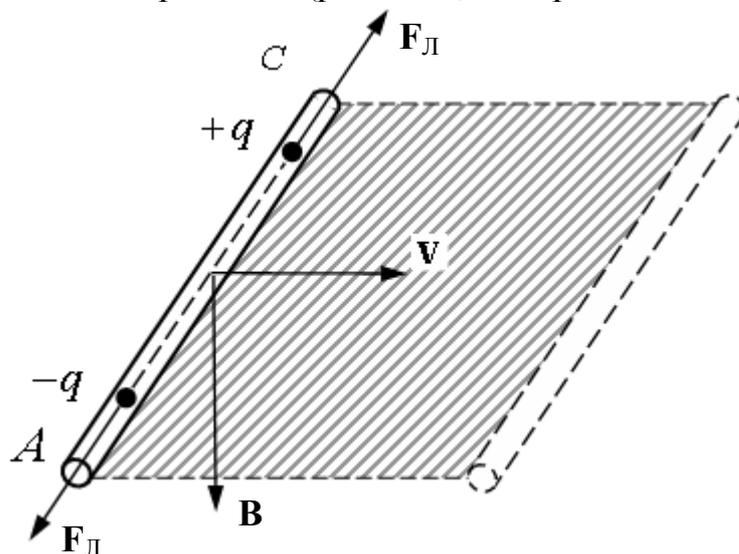


Рис. 11.9

Так как изменение магнитного потока за промежуток времени  $\Delta t$

$$\Delta\Phi = v\Delta t B l \sin \alpha,$$

значение ЭДС индукции при движении проводника в магнитном поле может быть выражена также следующим образом:

$$\varepsilon_i = vBl \sin \alpha,$$

где  $\alpha$  – угол между векторами магнитной индукции поля  $\mathbf{B}$  и скорости движения  $\mathbf{v}$  проводника.

В случае если неподвижный замкнутый проводящий контур находится в магнитном поле, индукция которого изменяется, то причиной

возникновения индукционного тока в контуре является *индуцированное (наведенное) электрическое поле*, силы которого и действуют на свободные носители зарядов в контуре.

Переменное магнитное поле индуцирует электрическое поле, которое является *вихревым*, а его силовые линии – замкнутыми. Это поле не является кулоновским, так как создается не зарядами, а переменным магнитным полем.

## 11.6. Индуктивность контура. Самоиндукция

Если по произвольному замкнутому контуру проходит электрический ток, то он создает собственное магнитное поле. Собственный магнитный поток, пронизывающий площадку, ограниченную контуром, называется *поток самоиндукции*  $\Phi_s$  контура. Поток самоиндукции прямо пропорционален силе тока:

$$\Phi_s = LI.$$

Коэффициент пропорциональности  $L$  называется *индуктивностью* контура и является его электрической характеристикой.

Из определения потока самоиндукции следует, что индуктивность контура численно равна потоку самоиндукции через площадку, ограниченную контуром, при силе тока в контуре, равной единице:

$$L = \frac{\Phi_s}{I}.$$

Индуктивность  $L$  зависит от геометрической формы и размеров контура и свойств среды, в которой он находится.

Энергия магнитного поля контура индуктивности  $L$ , по которому протекает электрический ток  $I$ , равна

$$W = \frac{LI^2}{2}.$$

Эта энергия определяется работой сторонних сил, которую необходимо совершить, чтобы преодолеть ЭДС самоиндукции  $\mathcal{E}_s$  и получить в контуре ток силой  $I$ .

Если по контуру протекает переменный электрический ток, то он создает переменное магнитное поле, и в этом контуре наблюдается явление электромагнитной индукции, которое называется *самоиндукцией*.

Электродвижущая сила самоиндукции  $\varepsilon_s$  прямо пропорциональна скорости изменения силы тока в контуре:

$$\varepsilon_s = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

В Международной системе единиц индуктивность измеряется в генри (Гн):  $1 \text{ Гн} = 1 \text{ В} \cdot 1 \text{ с} / 1 \text{ А}$ . Один генри – индуктивность такого контура, в котором изменение тока на 1 А за 1 с вызывает ЭДС самоиндукции, равную 1 В.

