

## 5.7. Контур с током в магнитном поле

Пусть контур с током помещен в магнитное поле, причем он может вращаться вокруг вертикальной оси  $OO'$  (рис. 5.30-1). Силы Ампера, действующие на стороны контура длиной  $l$ , перпендикулярны к ним и к магнитному полю и поэтому направлены вертикально: они лишь деформируют контур, стремясь растянуть его. Стороны, имеющие длину  $a$ , перпендикулярны  $\mathbf{B}$ , так что на каждую из них действует сила  $F = B Ia$ . Эти силы стремятся повернуть контур таким образом, чтобы его плоскость стала ортогональной  $\mathbf{B}$ .

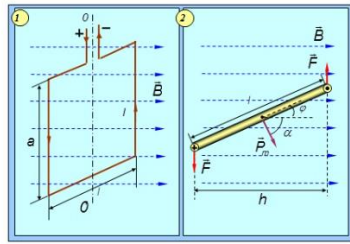


Рис. 5.30. Силы, действующие на контур с током в магнитном поле: 1 — вид сбоку; 2 — вид сверху (масштаб увеличен)

Видео 5.7. Контур с током в однородном магнитном поле.

Видео 5.8. Контур с током в неоднородном магнитном поле.

Момент пары сил (рис. 5.30-2) равен

$$M = Fh = Fl \cos \varphi = IBa l \cos \varphi, \quad (5.34)$$

где  $h = l \cos \varphi$  — плечо пары сил, а  $\varphi$  — угол между вектором  $\mathbf{B}$  и стороной  $l$ .

Величина, численно равная произведению силы тока  $I$ , протекающего в контуре, на площадь контура  $S = al$  называется **магнитным моментом**  $P_m$  плоского контура стоком

$$\vec{P}_m = I \vec{S} = \vec{n} IS. \quad (5.35)$$

Таким образом, мы можем записать момент пары сил в виде

$$M = BP_m \cos \varphi. \quad (5.36)$$

Магнитный момент контура с током — векторная величина. Направление  $\vec{P}_m$  совпадает с положительным направлением нормали к плоскости контура, которое определяется правилом винта: если рукоятка вращается по направлению тока в контуре, то поступательное движение винта показывает направление вектора  $\vec{P}_m$ . Введем в формулу (15.36) угол  $\alpha$  между векторами  $\vec{P}_m$  и  $\mathbf{B}$ . Справедливо соотношение

$$\cos \varphi = \sin \left( \frac{\pi}{2} - \varphi \right) = \sin \alpha.$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} M &= BP_m \cos \varphi; \\ \vec{M} &= [\vec{P}_m \times \vec{B}], \end{aligned} \quad (5.37)$$

то есть момент сил  $\vec{M}$ , действующий на виток с током в однородном магнитном поле, равен векторному произведению магнитного момента  $\vec{P}_m$  витка на вектор индукции магнитного поля  $\vec{B}$  (рис. 5.31). При  $\alpha = \pi/2$  величина момента сил максимальна

$$M_{\max} = BP_m.$$

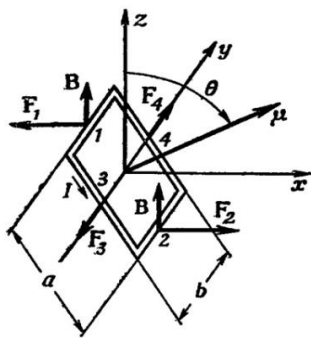


Рис. 5.31. Силы, действующие на прямоугольный контур с током в магнитном поле. Магнитное поле вертикально, а магнитный момент перпендикулярен плоскости контура

Видео 5.9. Контур с током в магнитном поле: модель электродвигателя.

Опять-таки прозрачна аналогия с электростатикой: говоря об электрическом диполе, мы получили выражение для момента сил, действующих на него со стороны электрического поля в виде

$$\vec{M} = [\vec{p} \times \vec{E}],$$

где  $\vec{p}$  — электрический дипольный момент.

Если контур с током находится в неоднородном магнитном поле, то на него, помимо вращающего момента  $\vec{M}$ , действует также сила  $\vec{F}$ , обусловленная наличием градиента магнитного поля. Проекция этой силы на направление касательной к силовой линии поля в данной точке определяется по формуле:

$$f_t = - \frac{\partial W}{\partial s} = P_m \frac{\partial B}{\partial s} \cos \alpha,$$

$$\vec{F}_t$$

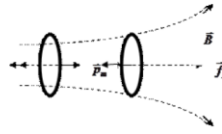


Рисунок 4.10. Контур с током в неоднородном магнитном поле.

Согласно написанной формуле, сила, действующая на контур в неоднородном магнитном поле, зависит от взаимной ориентации векторов  $\vec{P}_m$  и  $\vec{B}$ . Если эти векторы параллельны, то сила положительна и контур будет втягиваться в область более сильного поля; если векторы  $\vec{P}_m$  и  $\vec{B}$  антипараллельны, то сила отрицательна и контур будет выталкиваться из поля.

### Работа, совершаемая при перемещении контура с током в магнитном поле.

Рассмотрим отрезок проводника с током, способный свободно перемещаться по двум направляющим во внешнем магнитном поле. **Магнитное поле** будем считать однородным и направленным под углом  $\alpha$  по отношению к нормали к плоскости перемещения проводника.

$$\vec{F}_t$$

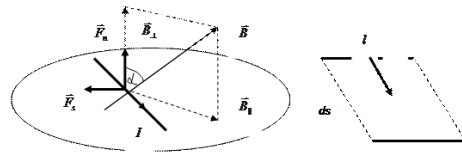


Рисунок 4.11. Отрезок проводника с током в однородном магнитном поле.

Как видно из рисунка, вектор  $\vec{B}$  имеет две составляющие  $\vec{B}_1$  и  $\vec{B}_2$ , из которых только составляющая  $\vec{B}_2$  создает силу, действующую в плоскости перемещения проводника. По абсолютной величине эта сила равна:  $F_t = IB_2 = IB \cos \alpha$ ,

где  $I$  — сила тока в проводнике;  $l$  — длина проводника;  $B$  — **индукция магнитного поля**.

Работа этой силы на элементарном пути перемещения  $ds$  есть:

$$dA = F_t ds = IB \cos \alpha \cdot ds.$$

Произведение  $l ds$  равно площади  $dS$ , замкнутой проводником при движении, а величина  $BdS \cos \alpha$  равна потоку магнитной индукции  $d\Phi$  через эту площадь. Следовательно, можем написать:  $dA = Id\Phi$ .

Рассматривая отрезок проводника с током как часть замкнутого контура и интегрируя это соотношение, найдем работу при перемещении контура с током в магнитном поле:  $A = I(\Phi_2 - \Phi_1)$ , где  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  обозначают поток индукции магнитного поля через площадь контура соответственно в начальном и конечном положениях.