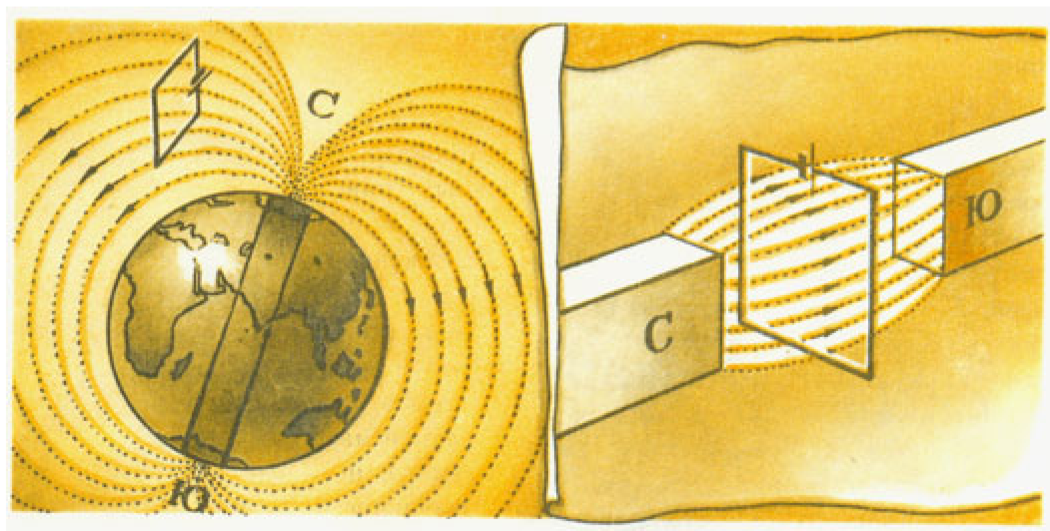
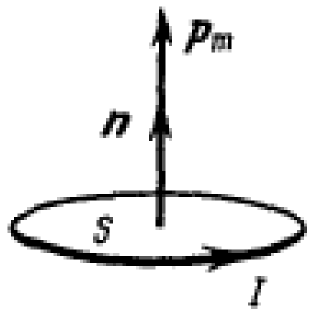
Лекция 10. Контур с током в магнитном поле. Магнитное поле в веществе



2013

Контур с током

Элементарный контур с током – контур с током, размерами которого можно пренебречь по сравнению с расстояниями до других токов.



Магнитный момент – основная характеристика контура с током – векторная величина, численно равная:

$$\boxed{\vec{p}_m = IS\vec{n}} \qquad |\vec{n}| = 1$$

I – сила тока; S – площадь, ограниченная контуром;
$\vec{n}$ – единичный вектор, связанный правилом правого винта с направлением тока.

Сила, действующая на контур с током

Сила Ампера, действующая на элемент с током:

$$d\vec{F}_A = I\left[d\vec{l}\,\vec{B}\right]$$

Сила Ампера, действующая на контур с током:

$$\vec{F}_A = I\oint_l \left[d\vec{l}\,\vec{B}\right]$$

Если магнитное поле однородно, то $\oint_l \left[d\vec{l}\,\vec{B}\right] = 0 \Rightarrow$

$$\vec{F}_A = 0$$

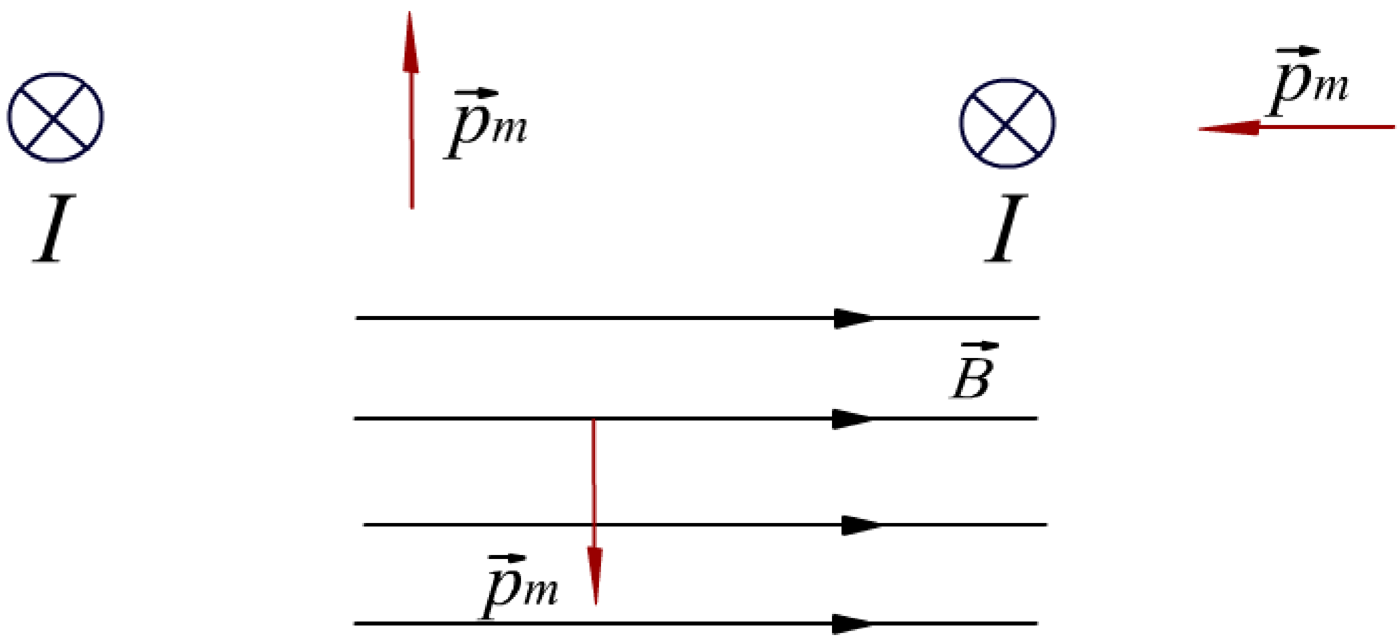
Сила, действующая на элементарный контур с током в неоднородном поле (B≠const)

$$\boxed{\vec{F}_A = p_m \frac{\partial \vec{B}}{\partial n}}$$

Направление силы, действующей на контур с током

Вектор силы совпадает по направлению с вектором элементарного приращения магнитной индукции в направлении нормали к контуру.

$$\vec{F}_A \uparrow\uparrow d\vec{B}$$



4

Момент сил, действующих на контур с током

Момент сил Ампера, действующих на контур:

$$\vec{M} = \oint [\vec{r}\, d\vec{F}_A] \qquad d\vec{F}_A = I[d\vec{l}\,\vec{B}]$$

После проведения расчетов:

$$\boxed{\vec{M} = [\vec{p}_m \vec{B}]}$$

Направление **М** определяется по правилу левой руки.

$$M = p_m B \sin\alpha$$

Момент сил, действующих на контур с током

$$\vec{p}_m \uparrow\uparrow \vec{B} \Rightarrow \sin\alpha = 0,\ M = 0$$

Контур с током находится в положении устойчивого равновесия.

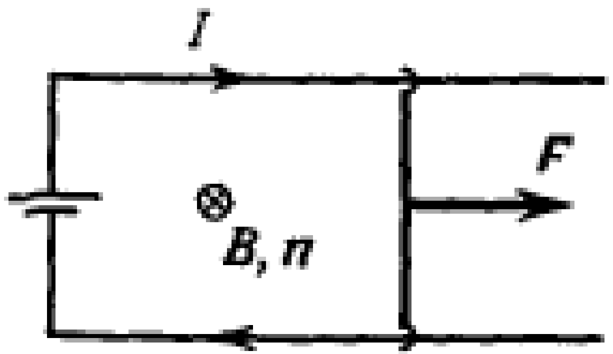
$$\vec{p}_m \uparrow\downarrow \vec{B} \Rightarrow \sin\alpha = 0,\ M = 0$$

Контур с током находится в положении <u>неустойчивого</u> равновесия.

В неоднородном магнитном поле контур с током ведет себя аналогично диполю в электрическом поле. Контур стремится развернуться так, чтобы $\vec{p}_m \uparrow\uparrow \vec{B}$ и втягивается в область более сильного поля.

Работа при перемещении контура с током

Рассмотрим контур с подвижной перемычкой.



Работа силы Ампера по перемещению перемычки на расстояние *dx*:

$$dA = Fdx = IBldx$$

$$dA = IBdS = Id\Phi$$

dS – приращение площади, ограниченной контуром;
dΦ – приращение магнитного потока через площадь dS.

Работа при перемещении контура с током

Общая формула:

$$\boxed{A = \int_{1}^{2} I d\Phi}$$

Если ток в контуре постоянный (I=const):

$$\boxed{A = I(\Phi_2 - \Phi_1)}$$

Ф1, Ф2 – магнитный потоки, пронизывающие контур в начальном и конечном положениях.

Магнитное поле в веществе

Гипотеза Ампера: магнитные свойства вещества обусловлены элементарными замкнутыми токами, циркулирующими внутри небольших частиц вещества – атомов, молекул.

Любое вещество является магнетиком – обладает способностью приобретать магнитный момент – намагничиваться. Намагниченное вещество (токи намагничивания) создает собственное магнитное поле, которое вместе с внешним (токи проводимости) образует результирующее поле в веществе.

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'$$

Намагниченность J

Каждый ток в веществе обладает магнитным моментом и создает магнитное поле. В отсутствие магнитного поля магнитные моменты ориентированы хаотично → суммарный магнитный момент равен нулю. Под действием магнитного поля магнитные моменты приобретают преимущественную ориентацию.

Намагниченность – количественная характеристика намагничивания веществ – суммарный магнитный момент в единице объема вещества.

$$\boxed{\vec{J} = \frac{1}{\Delta V}\sum \vec{p}_m}$$

$$[J] = \frac{A}{м}$$

Теорема Гаусса для векторов B и J

<u>Теорема Гаусса для вектора магнитной индукции</u> справедлива при наличии магнетика (магнитное поле токов намагничивания и токов проводимости не имеет источников, линии поля замкнуты).

$$\oint \vec{B}d\vec{S} = 0 \qquad (\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}')$$

Поток вектора магнитной индукции через любую замкнутую поверхность равен нулю.

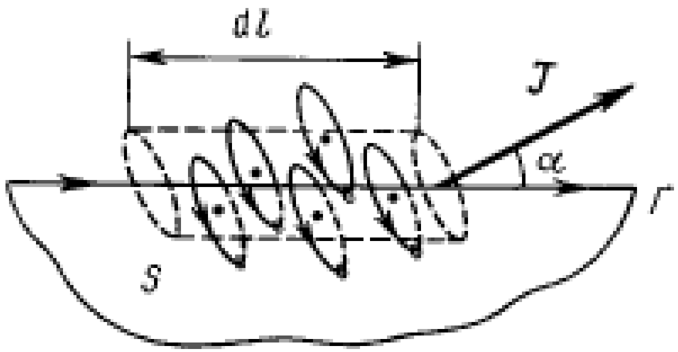
<u>Теорема Гаусса для вектора намагниченности:</u>

$$\boxed{\oint \vec{J}d\vec{S} = 0}$$

Теорема о циркуляции для вектора J

Циркуляция вектора J равна алгебраической сумме токов намагничивания, охватываемых контуром:

$$\boxed{\oint \vec{J} d\vec{l} = \sum I'}$$



$$dI' = I_M N = I_M n dV =$$

$$= I_M n dl \cos\alpha S_M = \vec{J} d\vec{l}$$

Напряженность магнитного поля H

Циркуляция вектора магнитной индукции зависит от токов проводимости *I* и токов намагничивания *I'* (молекулярных токов).

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \oint (\vec{B}_0 + \vec{B}')d\vec{l} = \mu_0 \sum I + \mu_0 \sum I'$$

С учетом: $\oint \vec{J} d\vec{l} = \sum I'$

$$\boxed{\oint \left(\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J} \right) d\vec{l} = \sum I}$$

теорема о циркуляции (закон полного тока) для вектора H.

Напряженность магнитного поля: $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J}$

Напряженность магнитного поля H

H - вспомогательный вектор (аналог вектора электрической индукции для электрического поля).

$$[H] = \frac{A}{м}$$

Взаимосвязь векторов B, J и H

Для большинства изотропных магнетиков:

$$\vec{J} = \chi \vec{H}$$

χ - магнитная восприимчивость, безразмерная величина.

Взаимосвязь векторов B, J и H

$$\chi = \mu - 1$$

μ – магнитная проницаемость среды

$$\boxed{\vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H}}$$

$$\vec{B} = (\chi + 1)\mu_0 \vec{H} = \mu_0(\vec{J} + \vec{H})$$