

Магнитное поле. Силы

Темы кодификатора ЕГЭ: сила Ампера, сила Лоренца.

В отличие от электрического поля, которое действует на любой заряд, магнитное поле действует только на *движущиеся* заряженные частицы. При этом оказывается, что сила зависит не только от величины, но и от направления скорости заряда.

Сила Лоренца

Сила, с которой магнитное поле действует на заряженную частицу, называется *силой Лоренца*. Опыт показывает, что вектор \vec{F} силы Лоренца находится следующим образом.

1. Абсолютная величина силы Лоренца равна:

$$F = qvB \sin \alpha. \quad (1)$$

Здесь q — абсолютная величина заряда, v — скорость заряда, B — индукция магнитного поля, α — угол между векторами \vec{v} и \vec{B} .

2. Сила Лоренца перпендикулярна обоим векторам \vec{v} и \vec{B} . Иными словами, вектор \vec{F} перпендикулярен плоскости, в которой лежат векторы скорости заряда и индукции магнитного поля.

Остаётся выяснить, в какое полупространство относительно данной плоскости направлена сила Лоренца.

3. Взаимное расположение векторов \vec{v} , \vec{B} и \vec{F} для *положительного* заряда q показано на рис. 1.

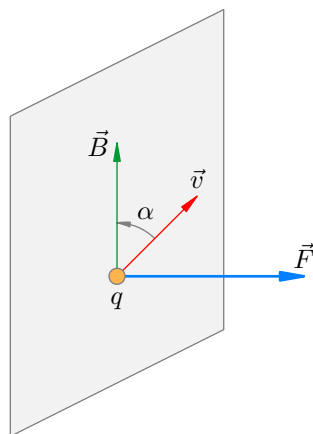


Рис. 1. Сила Лоренца

Направление силы Лоренца определяется в данном случае по одному из двух альтернативных правил.

Правило часовой стрелки. Сила Лоренца направлена туда, глядя откуда кратчайший поворот вектора скорости частицы \vec{v} к вектору магнитной индукции \vec{B} виден против часовой стрелки.

Правило левой руки. Располагаем левую руку так, чтобы четыре пальца указывали направление скорости частицы, а линии поля входили в ладонь. Тогда оттопыренный большой палец укажет направление силы Лоренца.

Для отрицательного заряда q направление силы Лоренца меняется на противоположное.

Всё вышеперечисленное является обобщением опытных фактов. Формула (1) позволяет связать размерность индукции магнитного поля с размерностями других физических величин:

$$B = \frac{F}{qv \sin \alpha} \Rightarrow T_L = \frac{H \cdot c}{Kл \cdot м} = \frac{В \cdot c}{м^2}.$$

Сила Ампера

Если металлический проводник с током поместить в магнитное поле, то на этот проводник со стороны магнитного поля будет действовать сила, которая называется *силой Ампера*.

Происхождение силы Ампера легко понять. Ведь ток в металле является направленным движением электронов, а на каждый электрон действует сила Лоренца. Все эти силы Лоренца, действующие на свободные электроны, имеют одинаковое направление и одинаковую величину; они складываются друг с другом и дают результирующую силу Ампера.

Направление силы Ампера определяется по тем же двум правилам, сформулированным выше.

Правило часовой стрелки. Сила Ампера направлена туда, глядя откуда кратчайший поворот тока к полю виден против часовой стрелки.

Правило левой руки. Располагаем левую руку так, чтобы четыре пальца указывали направление тока, а линии поля входили в ладонь. Тогда оттопыренный большой палец укажет направление силы Ампера.

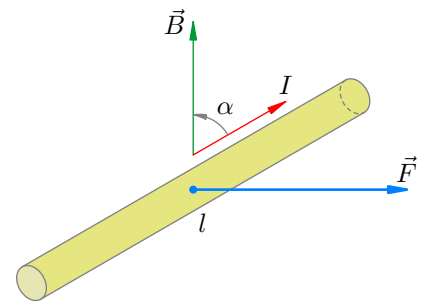


Рис. 2. Сила Ампера

Взаимное расположение тока, поля и силы Ампера \vec{F} указано на рис. 2.

На этом рисунке проводник имеет длину l , а угол между направлениями тока и поля равен α . Мы сейчас выведем выражение для абсолютной величины силы Ампера.

На каждый свободный электрон действует сила Лоренца:

$$F_1 = evB \sin \alpha,$$

где v — скорость направленного движения свободных электронов в проводнике.

Пусть N — число свободных электронов в данном проводнике, n — их концентрация (число в единице объёма). Тогда:

$$N = nV = nSl,$$

где V — объём проводника, S — площадь его поперечного сечения. Получаем:

$$F = NF_1 = nSl \cdot evB \sin \alpha = (enSv)Bl \sin \alpha.$$

Мы не случайно выделили скобками четыре множителя. Ведь это есть не что иное, как сила тока: $I = enSv$ (вспомните выражение силы тока через скорость направленного движения свободных зарядов!). В результате приходим к окончательной формуле для силы Ампера:

$$F = IBl \sin \alpha. \quad (2)$$

Хорошую возможность поупражняться в нахождении направлений магнитного поля и силы Ампера даёт взаимодействие параллельных токов. Оказывается, два параллельных провода отталкиваются, если направления токов в них противоположны, и притягиваются, если направления токов совпадают (рис. 3).



Рис. 3. Взаимодействие параллельных токов

Обязательно убедитесь в этом самостоятельно! Делаем так. Сначала берём произвольную точку на первом проводе и определяем направление магнитного поля, создаваемого в этой точке вторым проводом (правило вам известно — см. предыдущий листок). Ну а затем находим направление силы Ампера, действующей на первый провод со стороны магнитного поля второго провода.

Рамка с током в магнитном поле

В листках по термодинамике мы говорили о важности циклически работающих машин: они снабжают нас энергией. Понимание законов термодинамики позволило сконструировать тепловые двигатели, которые исправно служат нам и по сей день.

Понимание же законов электромагнетизма дало возможность создать циклическую машину другого типа — электродвигатель.

Мы рассмотрим один из элементов электродвигателя — рамку с током в магнитном поле. Разобравшись в её поведении, мы сможем уловить основную идею функционирования электродвигателя.

Пусть прямоугольная рамка 1234 может вращаться вокруг горизонтальной оси (рис. 4, слева). Рамка находится в вертикальном однородном магнитном поле \vec{B} . Ток течёт по рамке в направлении $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 1$; это направление показано соответствующими стрелками.

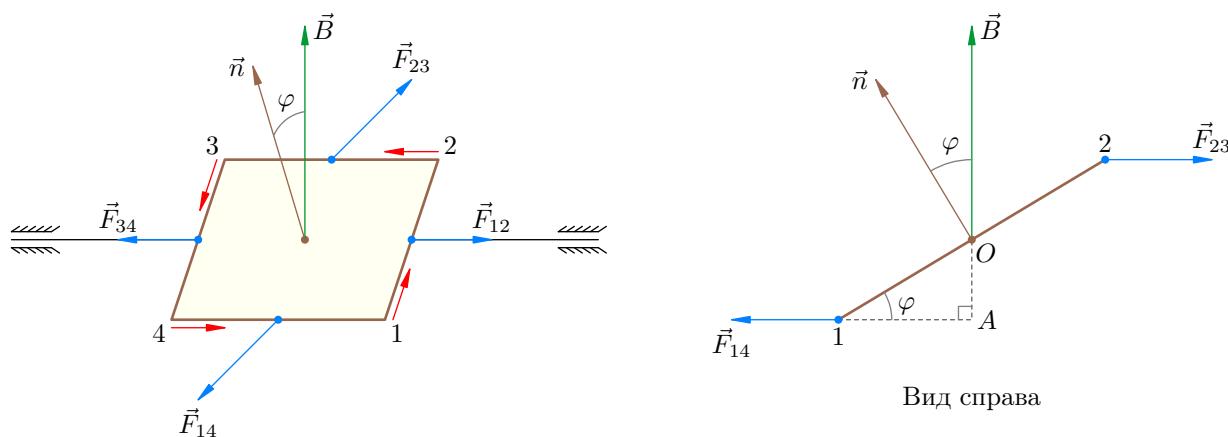


Рис. 4. Рамка с током в магнитном поле

Вектор \vec{n} называется *вектором нормали*; он перпендикулярен плоскости рамки и направлен туда, глядя откуда ток кажется циркулирующим против часовой стрелки. (Иными словами,

вектор \vec{n} сонаправлен с вектором индукции магнитного поля, которое создаётся током в рамке.) Поворот рамки измеряется углом φ между векторами \vec{n} и \vec{B} .

Теперь определим направления сил Ампера, которые действуют на рамку со стороны магнитного поля. Эти силы расставлены на рисунке; вот вам ещё одно упражнение на правило часовой стрелки (левой руки) — обязательно проверьте правильность указанных направлений!

Силы \vec{F}_{12} и \vec{F}_{34} , приложенные к сторонам 12 и 34, действуют вдоль оси вращения. Они лишь растягивают рамку и не вызывают её вращения.

Куда более интересны силы \vec{F}_{23} и \vec{F}_{14} , приложенные соответственно к сторонам 23 и 14. Они лежат в горизонтальной плоскости и перпендикулярны оси вращения. Эти силы *вращают* рамку в направлении по часовой стрелке, если смотреть справа (рис. 4, правая часть). Вычислим момент этой пары сил относительно оси O вращения рамки.

Пусть длина стороны 14 равна a . Тогда

$$F_{14} = F_{23} = I Ba.$$

Пусть длина стороны 12 равна b . Плечо d силы F_{14} , как видно из рис. 4 (справа) равно:

$$d = OA = \frac{b}{2} \sin \varphi.$$

Таким же будет плечо силы F_{23} . Отсюда получаем момент сил, вращающий рамку:

$$\mathcal{M} = F_{14}d + F_{23}d = I Ba \cdot \frac{b}{2} \sin \varphi + I Ba \cdot \frac{b}{2} \sin \varphi = I B ab \sin \varphi.$$

Теперь заметим, что $ab = S$ — площадь рамки. Окончательно имеем:

$$\mathcal{M} = IBS \sin \varphi. \quad (3)$$

В этой формуле площадь служит единственной геометрической характеристикой рамки. Это наводит на мысль, что только площадь рамки и существенна в выражении для вращающего момента. И действительно, можно доказать¹, что формула (3) справедлива для рамки *любой формы* с площадью S .

Как видно из формулы (3), максимальный вращающий момент равен:

$$\mathcal{M}_{\max} = IBS.$$

Эта максимальная величина момента достигается при $\varphi = \pi/2$, то есть когда плоскость рамки параллельна магнитному полю.

Вращающий момент становится равным нулю при $\varphi = 0$ и $\varphi = \pi$. Оба этих положения по-своему интересны.

При $\varphi = \pi$ плоскость рамки перпендикулярна полю, а векторы \vec{n} и \vec{B} направлены в разные стороны. Данное положение является *положением неустойчивого равновесия*: стоит хоть немного шевельнуть рамку, как силы Ампера начнут её вращать в том же направлении, поворачивая вектор \vec{n} к вектору \vec{B} (убедитесь!).

При $\varphi = 0$ плоскость рамки также перпендикулярна полю, а векторы \vec{n} и \vec{B} сонаправлены. Это — *положение устойчивого равновесия*: при отклонении рамки возникает вращающий момент, стремящийся вернуть рамку назад (убедитесь!). Начнутся колебания рамки, постепенно затухающие из-за трения. В конце концов рамка остановится в положении $\varphi = 0$; в этом положении вектор индукции магнитного поля рамки сонаправлен с вектором \vec{B} индукции внешнего

¹Разбивая рамку на бесконечно узкие полоски, неотличимые от прямоугольников.

магнитного поля². Полезное сопоставление: *рамка занимает такое положение, что её положительная нормаль ориентируется в том же направлении, что и северный конец стрелки компаса, помещённой в это магнитное поле.*

Таким образом, поведение рамки в магнитном поле становится ясным: если отклонить рамку от положения устойчивого равновесия и отпустить, то рамка будет совершать колебания. С точки зрения совершения механической работы это не очень хорошо: если намотать нить на ось вращения и подвесить к нити груз, то груз будет то подниматься, то опускаться.

Но вот если исхитриться и заставить ток менять направление в нужные моменты, то вместо колебаний рамки начнётся её непрерывное вращение и, соответственно, непрерывный подъём подвешенного груза. Тогда-то и получится полноценный электродвигатель; идея с переменной направления тока реализуется с помощью *коллектора и щёток.*

²Вот почему при намагничивании вещества элементарные токи ориентируются так, что их поля направлены в сторону внешнего магнитного поля.