

Закон электромагнитной индукции или «правило потока»?

М. ЛИВШИЦ

В ФИЗИКЕ возможны (хотя и редко) ситуации, когда одна и та же формула допускает различное содержание, т.е. описывает разные по сути физические законы. Рассмотрим один такой случай, связанный со знаменитым законом электромагнитной индукции, открытым Фарадеем.

«Правило потока» как объединение двух законов. Физический смысл закона Фарадея заключается в том, что изменяющееся во времени магнитное поле порождает вихревое электрическое поле. А именно, при изменении *во времени* магнитного потока (Φ), пронизывающего поверхность, ограниченную замкнутым *неподвижным* проводником, в этом проводнике индуцируется ЭДС (\mathcal{E}_i), равная по величине и противоположная по знаку скорости

изменения этого потока:

$$\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}. \quad (*)$$

Это соотношение называют также «правилом потока».

Однако формулу (*), называя по-прежнему законом электромагнитной индукции, в ряде учебников, в том числе и школьных, понимают более широко, включая еще одну причину возникновения ЭДС в проводящем контуре. Этой причиной является сила Лоренца, т.е. сила, действующая на движущийся заряд в магнитном поле. Величина этой силы равна

$$F_{\text{Л}} = qvB \sin \alpha,$$

где q – величина заряда, v – скорость его движения, B – модуль вектора

магнитной индукции поля, в котором движется заряд, α – угол между векторами \vec{v} и \vec{B} . Направление силы Лоренца определяется известным правилом левой руки.

Рассмотрим простейший случай движения проводника в магнитном поле, показанный на рисунке 1. Под действием силы Лоренца свободные электроны в проводнике (пластинке) перемещаются так, что нижний конец пластинки заряжается отрицательно,

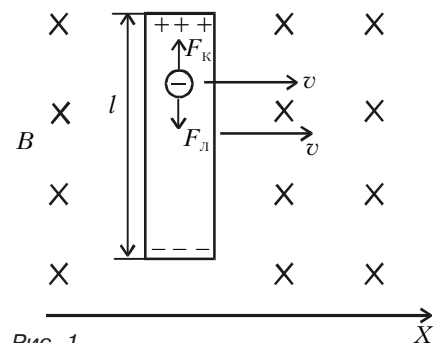


Рис. 1

а верхний – положительно. Это происходит до тех пор, пока возникающее из-за смещения электронов электрическое поле не начнет действовать на электроны кулоновской силой, равной по величине и противоположной по направлению силе Лоренца. Таким образом действие силы Лоренца на свободные заряды проводника, движущегося в магнитном поле, приводит к возникновению ЭДС индукции. Хотя

эта ЭДС не имеет никакого отношения к закону электромагнитной индукции Фарадея, оказывается, что ее можно описать точно такой же формулой. Действительно, напряженность наведенного в проводнике электрического поля равна

$$E = -\frac{F_{\text{Д}}}{q} = -vB,$$

а ЭДС индукции –

$$\mathcal{E}_i = E l = -vBl = -\frac{\Delta x}{\Delta t} Bl = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}.$$

Но в данном случае под $\Delta \Phi$ понимается не величина изменения во времени магнитного потока, пронизывающего данный контур (как в законе Фарадея), а величина магнитного потока, пересекаемого движущимся проводником за время Δt . Для замкнутого контура, перемещающегося или деформируемого в магнитном поле, под $\Delta \Phi$ понимается происходящее при этом изменение магнитного потока через этот контур.

Обобщение формулы ЭДС электромагнитной индукции, или «правила потока», на движение проводника в магнитном поле (говорят еще – на явление пересечения проводником линий магнитной индукции) можно использовать при решении широкого круга задач – для сколь угодно сложной конфигурации проводящего контура и для любого характера движения его частей (надо только применить этот расчет к отдельным элементам сложного контура и просуммировать результат). Часто гораздо удобнее вычислять величину ЭДС, индуцируемой при движении проводника в магнитном поле, пользуясь «правилом потока», а не прямым вычислением работы силы Лоренца.

Итак, «правило потока» утверждает, что ЭДС в контуре равна взятой с обратным знаком скорости изменения магнитного потока через данный контур независимо от того, меняется ли величина потока из-за изменения магнитного поля во времени при неподвижном контуре, или в результате перемещения или деформации контура, или из-за того и другого вместе.

Парадоксы, парадоксы... Так может быть, и не стоит различать причины возникновения ЭДС индукции и считать «правило потока» фундаментальным обобщением закона электромагнитной индукции? Оказывается, стоит, иначе такое отношение к «правилу потока» может вести к парадоксам. Вот несколько примеров.

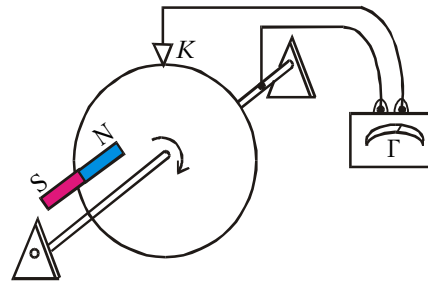


Рис. 2

1) *Магнитный поток, пронизывающий контур, остается неизменным: $\Delta \Phi / \Delta t = 0$, а ЭДС создается (рис. 2).*

Когда медный диск вращается, контур тока, казалось бы, не изменяется, проходя в пространстве по диску от контакта К к его оси, следовательно, магнитный поток через контур остается постоянным. Но физически эта часть контура осуществляется меняющимися в процессе вращения участками диска, поэтому на свободные электроны в диске, обладающие из-за его вращения скоростью, действует сила Лоренца и возникает ЭДС индукции.

2) *Изменение магнитного потока сквозь контур не приводит к возникновению ЭДС индукции (рис. 3).*

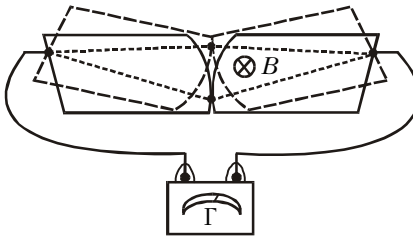


Рис. 3

При повороте металлических пластин с несколькими изогнутыми поверхностями соприкосновения, помещенных в однородное магнитное поле, перпендикулярное их плоскости, на некоторый угол магнитный поток через цепь, замыкающуюся в пластинах по точечным линиям, изменяется на большую величину. Однако поворот пластин связан с незначительным их перемещением, при котором произведение vB в формуле для силы Лоренца близко к нулю, поэтому ЭДС индукции практически отсутствует.

В чем же причина этих парадоксов?

В тех случаях, когда справедлив закон электромагнитной индукции, ЭДС существует вдоль данного геометрического контура независимо от того, материализуется этот контур или нет. В противоположность этому, для существования ЭДС индукции, порождает-

мой силой Лоренца, совершенно необходимо, чтобы контур был о веществе, т.е. представлял собой проводник. Именно в этом и состоит принципиальное различие явлений возникновения ЭДС индукции, вызываемых действием двух разных законов, объединенных одной формулой «правила потока». Эта формула и оказывается именно правилом, а не законом. Но «нет правил без исключений». Вот мы и познакомимся с исключениями из «правила потока».

А как избежать ошибок при использовании такого удобного правила и не наткнуться как раз на исключение?

Оказывается, имеется надежный ориентир: необходимо проверять, чтобы все время сохранялось точное соответствие между *физическим* контуром, состоящим из проводников, и *геометрическим* контуром, по которому вычисляется наводимая ЭДС. При нарушении такого соответствия необходимо вычисления производить отдельно: по закону Фарадея или непосредственно с помощью силы Лоренца. Иначе, как показывают приведенные выше примеры, возможны ошибки.

Примечание редактора. Тот факт, что две физически различные ситуации описываются одним и тем же законом, отнюдь не является случайным. Он находит полное объяснение в теории относительности Эйнштейна. Так, при равномерном приближении проводящего контура к неподвижному магниту возникновение тока в контуре объясняется действием силы Лоренца. Но если перейти в систему отсчета, связанную с контуром, то возникновение тока объясняется действием вихревого электрического поля. Подробнее об этом рассказывает, например, в статье А. Черноуцана «Электромагнитная индукция и принцип относительности», опубликованной в Приложении к журналу «Квант» №5/95.