

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 –

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

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.

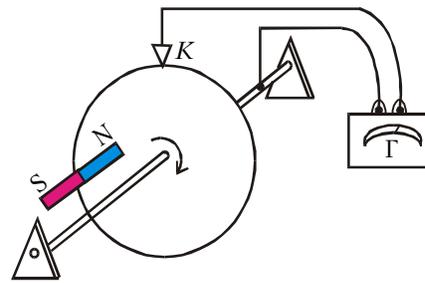


Рис. 2

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).*

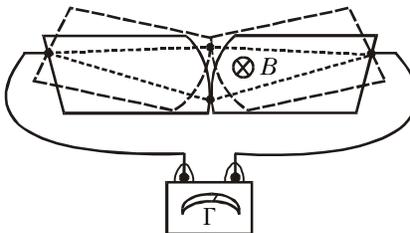


Рис. 3

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.