

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ СТОРОННИХ СИЛ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ. ПРАВИЛО ЛЕВОГО ВИНТА

Формулу

$$\varepsilon_{\text{и}} = -\frac{d\Phi}{dt}, \quad (1)$$

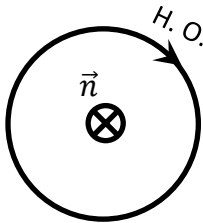


Рис. 1

отражающую закон электромагнитной индукции, следует рассматривать как самодостаточное соотношение. Но делать это можно лишь после того, как выполнено согласование направление нормали контура и направления его обхода. В противном случае знак левой части (1) никак не зависит от знака его правой части, и соотношение не имеет смысла. **Если индукционная ЭДС равна скорости именно убыви магнитного потока (знак «-» в правой части) то нормаль и обход контура должны быть согласованы друг с другом по правому винту.** Естественно, мы можем из (1) убрать знак «-», но тогда правый винт нужно будет сменить на левый. Таким образом, ни знак «-», ни тип винта, сами по себе, не имеют физического содержания, оно есть лишь в их сочетании друг с другом, реализуем двумя эквивалентными способами. Можно показать, что только выбранное сочетание (оно и реализуется в природе) не противоречит закону сохранения энергии — в этом состоит его физическое содержание.

Таким образом, если мы хотим определить направление сторонних сил индукции, возникающих в контуре, напрямую из закона электромагнитной индукции, нам надо будет выполнить следующую последовательность действий.

Таким образом, если мы хотим определить направление сторонних сил индукции, возникающих в контуре, напрямую из закона электромагнитной индукции, нам надо будет выполнить следующую последовательность действий.

- 1) Выбрать направление нормали контура.
- 2) Согласовать с направлением нормали контура направление его обхода.
- 3) Определить знак магнитного потока.
- 4) Определить знак изменения магнитного потока.
- 5) С помощью (1) определить знак ЭДС индукции.
- 6) Используя в обратном порядке правило знаков для ЭДС, определить направление сторонних сил электромагнитной индукции.

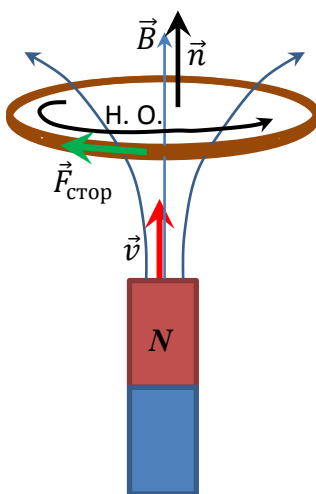


Рис. 2

Для иллюстрации описанной последовательности действий, рассмотрим ситуацию, изображенную на рис. 2. Направим вектор нормали вверх. В этом случае пронизывающий контур магнитный поток $\Phi > 0$. Далее ход рассуждений представим символически в виде логической цепочки:

$$\left. \begin{array}{l} \Phi > 0 \\ |\Phi| \nearrow \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{d\Phi}{dt} > 0 \Rightarrow \varepsilon_{\text{и}} = -\frac{d\Phi}{dt} < 0 \Rightarrow \vec{F}_{\text{стор}} \downarrow \uparrow \text{Н. О.} \quad (2)$$

($|\Phi| \nearrow$, поскольку магнит движется к контуру) Направление сторонних сил, определенное в результате проведенной цепочки рассуждений, показано на рис 2.

Легко убедиться, что от выбора нормали, направление сторонних сил не зависит, так и должно быть. Нельзя ли тогда поступить как-то проще? Ответ известен: можно — с помощью правила Ленца. Оно позволяет определить направление индукционного тока в контуре, используя компенсационный характер магнитного

поля, создаваемого этим током. В свою очередь направление индукционного тока задается направлением индуцированных сторонних сил. Следовательно, даже если, по каким-либо причинам индукционный ток в контуре не пойдет, можно представить, как будто бы он пошел, и определить направление сторонних сил. Выбирать нормаль, и согласованный с ней обход, при этом, не нужно.

Однако индукционное магнитное поле является пусть и весьма важным, но следствием индуцирования ЭДС. Также, как мы уже отметили, направление нормали, обхода контура и знак «-» в (1), сами по себе, не несут физического содержания: они существуют лишь у нас в голове. Следовательно, должен существовать наиболее прямой способ определения направления сторонних сил индукции, не требующий ни одной из этих воображаемых сущностей, а также индукционного магнитного поля. Такой способ действительно существует, по основному используемому принципу, его можно назвать правилом левого винта. В отечественной да и в зарубежной литературе ему уделяется незаслуженно мало внимания, в то время как он будет, пожалуй, даже попроще правила Ленца. Идея его в сущности проста. Поскольку от направления нормали направление сторонних сил не зависит, пусть нормаль у нас будет сперва направлена в то же полупространство, что и силовые линии, пронизывающие контур, т. е. так, как на рис 2. Если мы вдвигаем магнит, сторонние силы, благодаря знаку «-» в (1), будут направлены против обхода. А это значит, что с направлением нормали они просто образуют левый винт! Но если магнит движется от контура, тогда все уже будет не так, и чуть было не нашупанное решение снова потеряно. Однако в качестве нормального направления можно взять не сам вектор \vec{n} , а изменение нормальной составляющей вектора \vec{B} . При движении магнита вверх $d\vec{B}_n \uparrow \vec{n}$, и никаких принципиальных изменений не произойдет: также как и \vec{n} , $d\vec{B}_n$ образует с $\vec{F}_{\text{стор}}$ левый

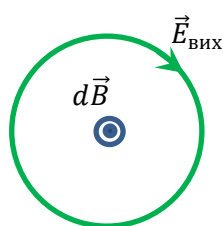


Рис. 3

винт. При движении вниз $d\vec{B}_n$ уже $\downarrow \vec{n}$. Но и $\vec{F}_{\text{стор}}$ также изменят направление. Следовательно $d\vec{B}_n$ и $\vec{F}_{\text{стор}}$ снова образуют левый винт! Легко убедиться, что эта закономерность будет выполняться для всех мыслимых случаев движения магнита, при которых магнитные линии пронизывают контур в направлении одного полупространства. Эта закономерность отражает известный факт, согласно которому именно левый винт образует вектор изменения магнитного поля и порождаемое этим изменением вихревое электрическое поле — так левый винт оказывается

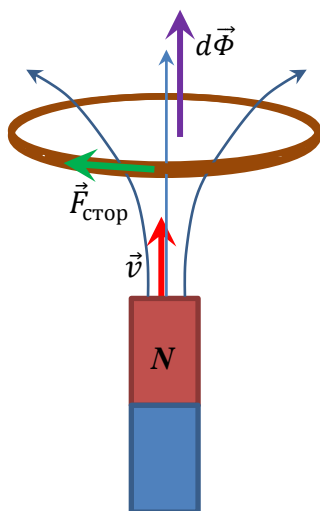
представленным в природе (рис. 3).

Но изменение магнитного поля — лишь частный случай изменения магнитного потока, а ведь именно оно приводит к индуцированию ЭДС. Поэтому, для окончательного решения задачи, от вектора $d\vec{B}$ следует перейти к векторной величине, характеризующей изменение именно магнитного потока, какими бы причинами оно не было вызвано. Поэтому мы введем в рассмотрение **вектор магнитного потока. По определению он равен произведению скаляра магнитного потока на вектор единичной нормали**

$$\vec{\Phi} = \Phi \vec{n}. \quad (3)$$

Это очень интересный вектор. Он замечателен тем, что хотя и определен через вектор нормали, его направление не зависит от выбора нормали. Действительно, если мы поменяем направление вектора \vec{n} , то сменится и знак скаляра Φ , а стало быть, направление вектора $\vec{\Phi}$ останется прежним: при направлении в одно полупространство, оно всегда будет совпадать с направлением изменения нормальной составляющей вектора \vec{B} . А, значит, случае вдвигания—выдвигания

магнита, при определении направления сторонних сил индукции, можно смело заменить $d\vec{B}_n$ на $d\vec{\Phi}$. Но можно, оставив в покое магнит, растягивать или сплющивать контур. Никакого $d\vec{B}_n$ в этом случае не будет. А вот $d\vec{\Phi}$ будет и это позволит нам определить направление сторонних сил индукции. Таким образом, нами обосновано утверждение:



Направление сторонних сил, индуцированных пронизывающим контур переменным магнитным потоком, образует с вектором изменения магнитного потока левый винт.

Рис. 4