

## СПЕЦИАЛИСТЫ ПО ЭЛЕКТРОПРИВОДУ ДОЛЖНЫ ЗНАТЬ ПАРАДОКСЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ И ИХ ОБЪЯСНЕНИЕ

**Введение.** В работах Николаева Г.В. [1] и других авторов заострѐн вопрос о парадоксах в электродинамике. По сути дела речь идёт о ситуациях, когда, используя привычные представления, не удаётся убедительным образом истолковать результаты эксперимента и практики. К числу таких парадоксов относятся также:

- наличие знака «минус» в формуле закона электромагнитной индукции;
- вращение рамки с током (неизменной величины и направления) при помещении её в магнитное поле, что согласно закону Ампера принципиально не может быть.

**Постановка задач исследования.** Цель настоящей работы – связать положения теории и практики в единое органическое целое по таким вопросам:

- какой знак должен стоять в формуле закона электромагнитной индукции;
- почему вращается рамка с током неизменной величины и направления при помещении её в магнитное поле.

Решение поставленных задач исключит наблюдаемую сейчас парадоксальность в работе таких электротехнических устройств, как катушки индуктивности, дроссели, трансформаторы и электрические машины.

**Материалы исследования.** Формулу закона электромагнитной индукции принято писать в виде 
$$e = -\frac{wd\Phi}{dt} \quad (1)$$
 где  $e$  – ЭДС, наводимая, например, в рамке с числом витков  $w$  магнитным потоком  $\Phi$ , который пронизывает рамку и изменяется во времени  $t$ . Однако во второй половине 20-го века появились публикации [2, 3], авторы которых указывали, что по методическим соображениям изложение теории, например, трансформатора более выгодно строить, сменив в (1) знак «-» на «+». Но предмет разговора нужно было строить на подтверждение знака «минус» работой реальных практических устройств (трансформаторов, дросселей, катушек индуктивности и т.п.). Информация о результатах таких исследований приведена в [4], где прямо указывается, что трансформатор не инвертирует фазу выходного сигнала по отношению к входному, если их съём осуществляется с идентичных зажимов обмоток. Следовательно, в случае трансформатора наличие знака «-» неудобно не только с методической точки зрения, но и ведёт к техническим недоразумениям. Это обязывает к смене знака в формуле (1) с «-» на «+». Развивая исследование, легко прийти к выводу, что запись основных уравнений для катушек индуктивности, дросселей и трансформаторов должна быть изменена согласно таблицы 1:

Таблица 1

Наименование	Традиционная форма	Форма записи согласно эксперимента
Катушка индуктивности	$u = iR - e_L$	$u = iR + e_L$
Дроссель	$u = iR - e_{п.р.} - e_{о.п.}$	$u = iR + e_{п.р.} + e_{о.п.}$
Трансформатор	$u_1 = i_1 R_1 - e_{p1} - e_1$ $i_1 = i_{10} - i_2'$	$u_1 = i_1 R_1 + e_{p1} + e_1$ $i_1 = i_{10} + i_2'$
где $u, u_1$ – напряжение сети питания; $i, i_1$ – ток в обмотке, подключенной к сети; $R, R_1$ – активное сопротивление той же обмотки; $e_{p1}, e_{п.р.}$ – ЭДС от потока рассеяния; $e_1, e_{о.п.}$ – ЭДС от основного магнитного потока; $i_{10}, i_2'$ – соответственно ток х.х. и приведенный ток вторичной обмотки трансформатора		

Однако смена знака в формуле (1) обеспечивает согласование положений теории с результатами эксперимента и практики лишь для указанных выше устройств. Расхождения между ними вновь будут иметь место, если обратиться к электрическим машинам. Действительно, пусть та же рамка приведена во вращение приводным механическим двигателем, тогда легко зафиксировать следующий результат: фаза наведѐнной в рамке ЭДС зависит от направления вращения и при смене последнего меняется на  $180^\circ$ . Объяснить это явление при любой однозначности формулы (1) невозможно. Нужна двухзначность, т.е. запись в виде  $e = \pm wd\Phi/dt$ . Тогда при вращении рамки против часовой стрелки  $e = -wd\Phi/dt = E_m \sin \omega t$ ; при вращении рамки по часовой стрелке  $e = wd\Phi/dt = E_m \sin(\omega t + 180^\circ)$ .

Отсюда следует, что объективно и полно построить анализ работы электротехнических устройств можно только при двухзначной форме записи формулы закона электромагнитной индукции.

Второй парадокс связан с убеждением физиков, электротехников и специалистов по электрическим машинам, что рамка с током неизменной величины и направления при помещении её в магнитное поле вращаться не будет. В качестве доказательства приводят рис.1, где показано, что согласно закона Ампера и

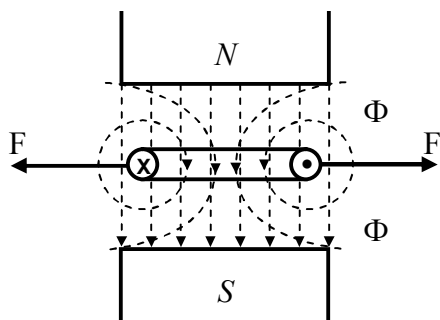


Рис.1. Иллюстрация к использованию закона Ампера

правила левой руки воздействующие на проводники рамки выталкивающие силы поставят её в положение устойчивого равновесия, а сами уравновесят друг друга. Однако согласно опытным данным такая рамка устойчивого исходного состояния не имеет и приходит во вращение либо произвольно, либо после толчка извне в любую сторону. Анализ показал, что объяснить это явление на основании закона Ампера не удастся.

Тогда было проведено сопоставление двух процессов формирования:

- вектора выталкивающей силы  $\vec{F}$ , действующей на проводники рамки;

- вектора Умова-Пойнтинга  $\vec{P}$  [5].

Оказалось, что между ними есть ярко выраженная аналогия. Прежде всего, оба процесса имеют энергетическую природу. Во-вторых, исходные и результирующие векторы образуют систему правоходового винта. В третьих, для них обязательно наличие магнитной компоненты. Но, как известно, вектор  $\vec{P}$  есть результат векторного произведения двух компонент: электрической  $\vec{E}$  и магнитной  $\vec{H}$ . Следовательно, и в формуле для  $\vec{F}$  должна присутствовать электрическая компонента. В формуле закона Ампера в качестве такой компоненты избран ток  $I$ , что неудачно, поскольку ток скаляр. Потому для обеспечения требуемой аналогии более выгодно в качестве электрической компоненты принять тангенциальную составляющую вектора электрической напряжённости  $\vec{E}_t$  и записать в формуле выталкивающей силы в виде соотношения пропорциональности:  $\vec{F} \equiv [\vec{E}_t \cdot \vec{H}]$ . При неподвижной рамке в создании  $\vec{E}_t$  участвует только источник питания, примем для неё обозначение  $\vec{E}_{t_u}$ . Если же рамка вращается, то кроме источника в создании тангенциальной составляющей электрической напряжённости участвует и ЭДС вращения. Принадлежащую последней составляющую обозначим через  $E_{t_b}$ .

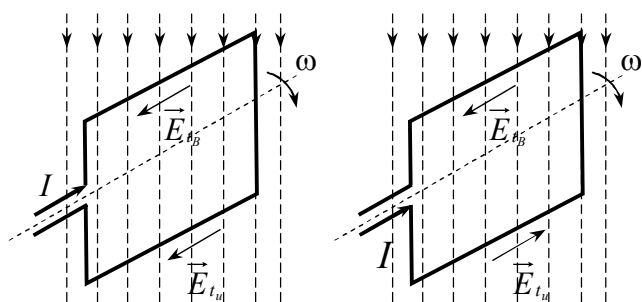


Рис.2. Иллюстрация к сложению и вычитанию  $E_{t_b}$  и  $E_{t_u}$ .

Легко видеть (рис.2), что за один оборот вращения рамки  $E_{t_u}$  и  $E_{t_b}$  либо складываются, либо вычитаются, т.е. формула результирующей силы запишется в виде соотношения

$$\vec{F} = [(\vec{E}_{t_u} \pm \vec{E}_{t_b}) \cdot \vec{H}].$$

Отсюда следует, что двигательный и тормозной моменты рамки за один оборот между собой не равны, т.е. она придёт во вращение. Поскольку периодическое изменение параметра или показателя принято называть модуляцией, то можно утверждать, что эффект вращения рамки основан на модуляции тангенциальной

составляющей вектора электрической напряжённости.

**Выводы.** Парадоксальность между положениями теории и результатами опытных данных на реальных практических устройствах не будет иметь места, если в формулу закона электромагнитной индукции ввести двузначность, а формулу выталкивающей силы записать с учётом модуляции тангенциальной составляющей электрической напряжённости.

#### Литература.

1. Николаев Г.В. Современная электродинамика и причины её парадоксальности. Томск. Из-во «Твердыня». 2003, 149с.
2. Коген-Далин В.В. Система условно-положительных направлений и векторные диаграммы электрических машин. Тр. МЭИ.-1958, вып.27, 59-63с.
3. Иванов Л.Л. К методике изложения некоторых вопросов курса электротехники. Сб. научно-методических статей, Электротехника, вып. 1.- М.: Высшая школа, 1971, 32-39с.
4. Китаев А.В. Точку в споре о записи основных уравнений трансформатора должен поставить эксперимент. «Электричество». - №7. - 1997. - С. 42-47.
5. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники.- М.: Высшая школа, 1978, 607с.