

Четвертая электромагнитная ИНДУКЦИЯ

Аннотация

Рассматриваются варианты электромагнитной индукции. Выделяется индукция, вызванная изменением потока электромагнитной энергии. Находится зависимость э.д.с. этой индукции от плотности потока электромагнитной энергии и параметров провода. Рассматривается механизм возникновения потока энергии, поступающего в провод и компенсирующего тепловые потери.

Оглавление

1. Введение
 2. Собственный поток энергии
 3. Внешний поток энергии
 4. Откуда приходит поток энергии?
- Литература

1. Введение

Известен закон электромагнитной индукции

$$e = \frac{\partial \Phi}{\partial t}, \quad (1)$$

где Φ - магнитный поток, e - э.д.с. Известно также [1], что эта электромагнитная индукция - появление э.д.с. в проводнике может возникать как следствие выполнения двух законов

$$F = q(v \times B), \quad (2)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}. \quad (3)$$

В соответствии с этим различают два вида электромагнитной индукции –

первый вид - случай (3), когда в проводнике э.д.с. появляется вследствие изменения магнитного потока, - *электромагнитная индукция, вызванная изменением магнитного потока;*

второй вид - случай (2), когда э.д.с. в проводнике появляется под действием магнитной силы Лоренца вследствие взаимного перемещения провода и магнитного поля без изменения магнитного потока, - *электромагнитная индукция, вызванная силой Лоренца*.

Известен и третий вид электромагнитной индукции, возникающей в униполярном генераторе Фарадея – *униполярная электромагнитная индукция*. В этом генераторе двигатель вращает постоянный магнит, а на радиусе магнита создается э.д.с., которая определяется по формуле вида

$$e = \omega BL^2/2, \quad (4)$$

где

B - индукция постоянного магнита,

L - длина радиуса магнита,

ω - угловая скорость вращения.

Эта формула получена разными методами: в [2] с применением теории относительности и в [3] на основе закона сохранения импульса.

Широко известен и тот факт, что ток индуцируется в проводнике, находящемся в потоке энергии электромагнитной волны. Назовем *электромагнитную индукцию, вызванную изменением потока электромагнитной энергии четвертым видом* электромагнитной индукции. Далее определяется э.д.с. этой индукции в зависимости от плотности потока.

В [4] показано следующее. Если, тело находится в равномерном потоке электромагнитной энергии

$$S = E \times H, \quad (5)$$

то на него действует сила (здесь и далее используется система СИ)

$$F = V \left(\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{S \varepsilon \mu}{c^2} \right) + \frac{S \sqrt{\varepsilon \mu}}{c} \right), \quad (6)$$

где

V - объем тела, в котором электромагнитное поле взаимодействует с зарядами и токами,

ε - относительная диэлектрическая проницаемость тела,

μ - относительная магнитная проницаемость тела,

c - скорость света в вакууме,

В потоке электромагнитной энергии может оказаться электрон. Можно полагать, что этот поток в теле электрона всегда является равномерным (в силу его малых размеров). Тогда на электрон будет действовать сила (6).

2. Собственный поток энергии

Известно, что мощность тепловых потерь в проводе равна потоку вектора Пойтинга через поверхность провода, а плотность этого потока определяется электрической напряженностью и магнитной напряженностью, создаваемыми на поверхности провода током в этом проводе.

Рассмотрим отрезок провода, по которому протекает переменный ток с плотностью j . При этом ток и напряженности в проводе

$$J = \frac{\pi d^2}{4} j, \quad (9)$$

$$E = j\rho, \quad (10)$$

$$H = J/(\pi d) = 0.25dj, \quad (11)$$

а плотность потока электромагнитной энергии, входящего в провод со всех сторон (назовем его *собственным*),

$$S = EH = 0.25d\rho j^2. \quad (12)$$

Здесь

d - диаметр провода,

ρ - удельное сопротивление провода.

Поток электромагнитной энергии, входящего в провод длины L ,

$$S_L = S \cdot \pi dL \quad (13)$$

или

$$S_L = 0.25\pi L d^2 \rho j^2. \quad (14)$$

Тепловая мощность, рассеиваемая в проводе, имеющем объем

$$V = 0.25\pi L d^2, \quad (15)$$

определяется той же величиной. Следовательно, входящий электромагнитный поток позволяет току преодолевать сопротивление движению и совершает работу, которая превращается в тепло.

Этот известный вывод вуалирует естественный вопрос: как ток может привлекать поток, если ток появляется благодаря потоку? Естественно предположить, что поток создает е.д.с., которая "движет ток". Далее определяется эта е.д.с.

Подставляя (12) в (6) находим силу

$$F = 0.25d\rho V \left(\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{j^2 \epsilon \mu}{c^2} \right) + \frac{j^2 \sqrt{\epsilon \mu}}{c} \right) \quad (16)$$

Эта сила действует на все заряды (электроны) в проводе, направлена в сторону тока (т.е. она не действует на провод в целом). Именно она позволяет току преодолевать сопротивление движению и совершает работу, которая превращается в тепло.

Сила (16) определена при известной плотности тока. Но ток появляется только в замкнутой цепи. Следовательно, до замыкания цепи в проводе должна существовать э.д.с., создаваемая этой силой. Поскольку э.д.с.

$$e = \rho j, \quad (17)$$

то из (6) и (32) можно найти э.д.с. при известной плотности потока энергии (и неизвестных напряженностях E и H в этом потоке).

В частности, для постоянного потока из (6) находим

$$F = VS \sqrt{\epsilon \mu} / c, \quad (18)$$

а из (16) находим

$$F = 0.25 d \rho V j^2 \sqrt{\epsilon \mu} / c \quad (19)$$

Следовательно,

$$j^2 = \frac{4Fc}{d\rho V \sqrt{\epsilon \mu}} = \frac{4S}{d\rho}. \quad (20)$$

и, с учетом (17),

$$e^2 = 4S\rho/d. \quad (21)$$

Для синусоидального потока

$$S = S_o \sin^2(\omega t) \quad (22)$$

из (6) находим

$$\begin{aligned} F &= V \left(\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{S_o \epsilon \mu \cdot \sin^2(\omega t)}{c^2} \right) + \frac{S_o \cdot \sin^2(\omega t) \sqrt{\epsilon \mu}}{c} \right) = \\ &= \frac{S_o V \sqrt{\epsilon \mu}}{c} \left(\frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon \mu} \cdot \sin(2\omega t) + \sin^2(\omega t) \right) \end{aligned} \quad (23)$$

При достаточно низких частотах

$$\left(\omega \ll c / \sqrt{\epsilon \mu} \right) \quad (24)$$

по (23, 16) можно принять соответственно

$$F = \frac{VS_o \cdot \sin^2(\omega t) \sqrt{\epsilon \mu}}{c}, \quad (25)$$

$$F = 0.25 d \rho V \frac{j^2 \sqrt{\epsilon \mu}}{c}. \quad (26)$$

Следовательно,

$$j^2 = \frac{4Fc}{d\rho V \sqrt{\varepsilon\mu}} = \frac{4S_o \sin^2(\omega t)}{d\rho} \quad (27)$$

и, с учетом (17),

$$e = \sin(\omega t) \sqrt{\frac{4\rho S_o}{d}}. \quad (28)$$

Это и есть четвертая электромагнитная индукция. Как следует из (21, 28), поток электромагнитной энергии создает э.д.с. в проводе вне зависимости от того, замкнут он или разомкнут.

3. Внешний поток энергии

Очевидно, что собственный поток концентрируется вокруг провода постепенно. Следовательно, есть область, где может оказаться посторонний провод, не связанный с генератором. Поэтому рассмотрим случай, когда провод находится в области постороннего, *внешнего* потока электромагнитной энергии, т.е. потока, созданного при отсутствии тока в данном проводе (провод разомкнут).

Предположим, что *внешний* поток электроэнергии пронизывает провод вдоль диаметра (а не входит в него со всех сторон, как в предыдущем случае). Пусть плотность этого внешнего потока равна (22). В этом случае сила (6) при достаточно низких частотах принимает вид (25), а ток, возбуждаемый внешним потоком, как следует из (27), принимает вид

$$j = 2\sin(\omega t) \sqrt{\frac{S_o}{d\rho}} \quad (29)$$

Учитывая, что

$$S_o = E_o H_o = E_o^2 \sqrt{\frac{\varepsilon_o \varepsilon}{\mu_o \mu}}, \quad (30)$$

из (29) находим:

$$j = 2\sin(\omega t) E_o \sqrt{\frac{1}{d\rho} \sqrt{\frac{\varepsilon_o \varepsilon}{\mu_o \mu}}} = \frac{2\sin(\omega t) E_o}{\sqrt{d\rho}} \sqrt{\frac{\varepsilon_o \varepsilon}{\mu_o \mu}}. \quad (31)$$

Это – ток, наводимый потоком энергии в проводе, пронизываемым потоком энергии S_o . Этот поток энергии в воздухе определяется как

$$S_o = E'_o H'_o = E_o'^2 \sqrt{\frac{\varepsilon_o}{\mu_o}}, \quad (32)$$

где E'_o, H'_o – напряженности внешнего поля, в котором находится провод. Поскольку плотность потока не изменяется при его переходе из воздуха в провод, то из (30, 32) находим:

$$E_o^2 \sqrt{\frac{\epsilon_o}{\mu_o}} = E_o'^2 \sqrt{\frac{\epsilon_o \epsilon}{\mu_o \mu}}, \quad (33)$$

или

$$E_o = E_o' \sqrt[4]{\frac{\epsilon}{\mu}}. \quad (34)$$

Объединяя (31) и (34), получаем:

$$j = \frac{2 \sin(\omega t) E_o'}{\sqrt{d \rho}} \sqrt[4]{\frac{\epsilon_o}{\mu_o}} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \quad (35)$$

Найдем э.д.с., возникающую в проводе,

$$e = j \rho. \quad (36)$$

Совмещая (35) и (36), находим:

$$e = 2 \sin(\omega t) E_o' \sqrt{\frac{\rho}{d}} \sqrt[4]{\frac{\epsilon_o}{\mu_o}} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \quad (37)$$

Учитывая, что $\sqrt[4]{\epsilon_o/\mu_o} = 19.4$, получаем

$$e = 40 \sin(\omega t) E_o' \sqrt{\frac{\rho \epsilon}{\mu d}} \quad (38)$$

Таким образом, в проводе, который находится во внешнем потоке (32), возникает э.д.с. (38).

Теперь замкнем провод. Если петля провода будет иметь вид двух параллельных отрезков (соединенных короткими переключками), то в этих отрезках возникнут противоположно направленные э.д.с. и тока не будет. Можно поэтому утверждать, что в замкнутом проводе, находящемся в потоке (31), не появляется ток. Однако, если часть замкнутого провода экранирована, то под действием *внешнего* потока электромагнитной энергии в нем возникает ток, вызванный э.д.с. (38). Этот эффект должен наблюдаться и около линии передачи постоянного тока. Его можно проверить экспериментально.

4. Откуда приходит поток энергии?

Выше остался невыясненным вопрос о том, как же привлекается собственный поток в провод до того, как ток появился? Представление о блуждании потока по пространству не

кажется убедительным [1]. Кроме того, как провод распознает, чей поток пролетает рядом? Может быть, это поток "чужого" генератора? Вместе с этим существует и другой вопрос. Длинная линия излучает поток энергии и в то же время провода этой линии поглощают поток энергии для компенсации тепловых потерь. Как сочетаются эти противоположные процессы?

Представляется, что объяснение может быть следующим. Каждый элемент провода с током излучает поток электромагнитной энергии. Часть этого потока является потоком излучения, а часть пронизывает следующий элемент провода. Этот поток в этом элементе создает силу, действующую на заряды, т.е. определенную выше э.д.с. четвертой электромагнитной индукции. Эта сила создает ток. Таким образом, ток в следующем элементе возникает как результат потока электромагнитной энергии, созданного током предыдущего элемента.

Такое представление хорошо согласуется с тем известным фактом, что у молнии существует лидер, движущийся со скоростью в несколько сот километров в секунду.

Вспомним, наконец, о коаксиальном кабеле. Пусть по центральному проводу течет постоянный ток. Этот провод изолирован от внешнего потока энергии. Откуда же появляется поток энергии, компенсирующий тепловые потери в элементе провода? Очевидно, что этот поток может появиться только со стороны других элементов провода, что подтверждает высказанную гипотезу. (Заметим, что поток энергии, созданный некоторым элементом тока, НЕ может воздействовать на этот элемент тока, точно также как поле заряда не может воздействовать на этот заряд.)

Литература

1. Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. Фейнмановские лекции по физике. Т. 6. Электродинамика. Москва, изд. "Мир", 1966.
2. Тамм И.Е. Основы теории электричества, Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2003, стр. 547.
3. Хмельник С.И. Принцип обратимости в униполярных машинах Фарадея, <http://vixra.org/pdf/1407.0145v2.pdf>
4. Хмельник С.И. Силы Лоренца, Ампера и закон сохранения импульса. Количественный анализ и следствия, <http://vixra.org/pdf/1407.0065v2.pdf>