

# 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.

## Оглавление

1. Введение
  2. Собственный поток энергии
  3. Внешний поток энергии
- Литература

## 1. Введение

Известен закон электромагнитной индукции

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

где  $\Phi$  - 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,

$\omega$  - 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,

$\varepsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость тела,

$\mu$  - 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

$$j = j_o \sin(\omega t). \quad (8)$$

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*),

$$S_1 = EH = 0.25d\rho j^2. \quad (12)$$

Здесь

$d$  - диаметр провода,

$\rho$  - удельное сопротивление провода.

Поток электромагнитной энергии, входящего в провод длины  $L$ ,

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

Тогда

$$S_{L1} = 0.25\pi Ld^2 \rho j^2. \quad (14)$$

Тепловая мощность, рассеиваемая в проводе, имеющем объем

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

определяется так же.

В этом случае сила (6) принимает вид

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

Пусть плотность тока

$$j = j_o \sin(\omega t). \quad (17)$$

Тогда

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

или

$$F = \frac{0.25d\rho j_o^2 V \sqrt{\epsilon \mu}}{c} \sin(\omega t) \left( \frac{2\omega \cos(\omega t) \sqrt{\epsilon \mu}}{c} + \sin(\omega t) \right) \quad (18)$$

При достаточно низких частотах

$$\left( \omega \ll \frac{c}{2\sqrt{\varepsilon\mu}} \right) \quad (19)$$

можно принять

$$F = \frac{0.25d\rho_j^2 V \sqrt{\varepsilon\mu}}{c} \sin^2(\omega t) \quad (20)$$

т.е. средняя сила

$$F = (0.25d\rho_j^2 V \sqrt{2\varepsilon\mu}) / c \quad (21)$$

Эта сила действует на электроны, направлена в сторону тока и позволяет ему преодолевать сопротивление движению, а, точнее, совершает работу, которая превращается в тепло.

### 3. Внешний поток энергии

Теперь рассмотрим случай, когда провод находится в области постороннего, *внешнего* потока электромагнитной энергии, т.е. потока, созданного при отсутствии тока в данном проводе.

Теперь предположим, что *внешний* поток электроэнергии пронизывает провод вдоль диаметра. Пусть плотность этого внешнего потока

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

В этом случае сила (6) принимает вид

$$F = VS_o \left( \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\sin^2(\omega t) \varepsilon\mu}{c^2} \right) + \frac{\sin^2(\omega t) \sqrt{\varepsilon\mu}}{c} \right) \quad (23)$$

или

$$F = \frac{VS_o \sqrt{\varepsilon\mu}}{c} \sin(\omega t) \left( \frac{2\omega \cos(\omega t) \sqrt{\varepsilon\mu}}{c} + \sin(\omega t) \right) \quad (24)$$

При достаточно низких частотах (19) можно принять

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

т.е. средняя сила

$$F = VS_o \sqrt{2\varepsilon\mu} / c \quad (26)$$

Из сравнения (21) и (26) следует, что сила (26) превышает силу (21) при

$$S_o > 0.25d\rho_j^2 \quad (27)$$

а ток, возбуждаемый внешним потоком,

$$j_o = 2\sqrt{\frac{S_o}{d\rho}} \quad (28)$$

Учитывая, что

$$S_o = EH = E^2 \sqrt{\frac{\epsilon_o \epsilon}{\mu_o \mu}}, \quad (29)$$

из (28) находим:

$$j_o = 2E \sqrt{\frac{1}{d\rho} \sqrt{\frac{\epsilon_o \epsilon}{\mu_o \mu}}} = \frac{2E}{\sqrt{d\rho}} \sqrt[4]{\frac{\epsilon_o \epsilon}{\mu_o \mu}} \quad (30)$$

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

$$S_o = E_o H_o = E_o^2 \sqrt{\frac{\epsilon_o}{\mu_o}}, \quad (31)$$

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 (29, 31) находим:

$$E_o^2 \sqrt{\frac{\epsilon_o}{\mu_o}} = E^2 \sqrt{\frac{\epsilon_o \epsilon}{\mu_o \mu}}, \quad (32)$$

или

$$E = E_o \sqrt[4]{\frac{\mu}{\epsilon}}, \quad (33)$$

Объединяя (30) и (33), получаем:

$$j_o = \frac{2E_o}{\sqrt{d\rho}} \sqrt[4]{\frac{\epsilon_o}{\mu_o}}. \quad (34)$$

Найдем э.д.с., возникающую в проводе,

$$e_o = j_o \rho. \quad (35)$$

Совмещая (35) и (34), находим:

$$e_o = 2E_o \sqrt{\frac{\rho}{d}} \sqrt[4]{\frac{\epsilon_o}{\mu_o}} \quad (36)$$

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

$$e_o \approx 40E_o \sqrt{\frac{\rho}{d}}. \quad (37)$$

Таким образом, в проводе, который находится в потоке (31), возникает э.д.с. (37).

### 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>