

# Принцип обратимости в униполярных машинах Фарадея

## Аннотация

Показано, что из существования потока электромагнитного импульса и закона сохранения импульса следует объяснение принципа действия генератора Фарадея.

## 1. Введение

Электрические униполярные машины, прообразом которых послужил генератор Фарадея, имеют широкую область применения и изготавливаются многими крупными фирмами. Естественно, имеется и методика расчета [1]. Вместе с тем научная обоснованность этой методики, а, проще говоря, общепризнанное объяснение принципа действия этого генератора отсутствует.

Казалось бы, для объяснения генератора проще всего воспользоваться принципом обратимости электрических машин и использовать принцип действия двигателя Фарадея. Но проблема в том, что и этот принцип плохо обоснован (и доказательством этого служит как раз невозможность "инвертировать" его в применении к генератору).

Ниже используется объяснение принципа действия двигателя Фарадея, данное в [2], и показывается, что аналогичный подход можно использовать для объяснения принципа действия генератора Фарадея.

## 2. Моделирование двигателя Фарадея

В двигателе Фарадея (см. рис. 1) имеется электропроводящий магнит с индукцией  $B$ , линия тока  $I$ , проходящего по оси вращения, радиусу магнита и неподвижный контакт  $K$ . На токопроводящем радиусе имеется электрическая напряженность

$$E = j\rho, \quad (1)$$

где  $j$  - плотность тока,  $\rho$  - удельное сопротивление. Магнитная напряженность  $H$  пропорциональна индукции  $B$ . Векторы этих напряженностей взаимно перпендикулярны и поэтому возникает поток электромагнитной энергии с плотностью

$$S = EH. \quad (2)$$

Заметим, что этот поток возникает в статическом электромагнитном поле. Поток статического поля замкнут (из-за закона сохранения энергии) и поэтому показан на рис. 1 цилиндрами. Радиус магнита, по которому течет ток  $I$ , является линией соприкосновения этих цилиндров. Вектор потока  $S$ , лежащий на поверхности магнита, перпендикулярен указанному радиусу. Этот поток  $S$  создает силу  $F$ , направленную противоположно вектору потока  $S$ , и вращающую магнит со скоростью  $v$ . Эта сила является силой Хмельника [2] и вычисляется по формуле

$$F = V \cdot S \cdot \sqrt{\epsilon\mu} / c, \quad (3)$$

где

$S$  - плотность потока энергии,

$V$  - объем тела, пронизываемого потоком электромагнитного поля,

$\epsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость магнита, точнее, той его части, по которой протекает ток,

$\mu$  - относительная магнитная проницаемость магнита,

$c$  - скорость света в вакууме.

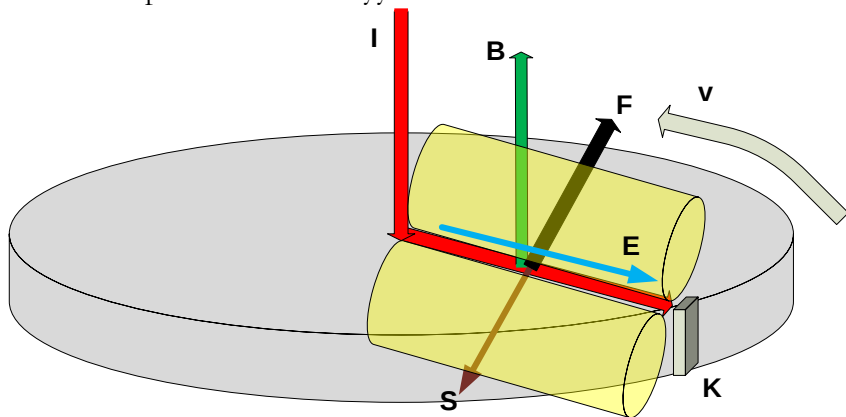


Рис. 1.

В [3] показано, что диэлектрическая проницаемость проводника с током зависит только от  $\mu$  и  $\rho$ :

$$\epsilon = \left( \frac{c\mu_0}{\rho} \right)^2 \mu. \quad (4)$$

где

$\mu_0$  - магнитная проницаемость вакуума,

$\rho$  - удельное сопротивление проводника.

Объединяя (1, 3, 4), получаем

$$F = VjB, \quad (5)$$

где

$j$  - плотность тока,

$B$  - магнитная индукция.

или

$$F = IBL, \quad (6)$$

где

$I$  - ток,

$L$  - длина радиуса.

Формально эта формула совпадает с формулой силы Ампера, но только формально, т.к. здесь нет изменяющегося магнитного поля.

Например, при  $B = 1[T]$ ,  $j = 4[A/sm^2] = 4 \cdot 10^4[A/m^2]$  из (32с) находим, что  $F[N] = 4 \cdot 10^4 V[m^3]$ . В частности, при  $V = 10^{-3}[m^3]$  находим, что  $F = 40[N]$ .

Обозначим:

$U$  - напряжение источника,

$R$  - общее сопротивление,

$L$  - длина радиуса,

$l = L/2$  - средний радиус приложения силы,

$J$  - момент инерции,

$\omega$  - скорость вращения,

$v = \omega l = \omega L/2$  - средняя линейная скорость,

$P_H$  - мощность нагрузки двигателя.

$M_H$  - момент нагрузки.

По закону сохранения момента импульса имеем:

$$J \frac{d\omega}{dt} = Fl - M_H. \quad (7)$$

Следовательно,

$$\frac{d\omega}{dt} = (FL/2 - M_H)/J. \quad (8)$$

Мощность, развиваемая силой  $F$ ,

$$P_F = vF = \omega FL/2 \quad (9)$$

или, с учетом (6),

$$P_F = \omega IBL^2/2. \quad (10)$$

Уравнение баланса мощности имеет вид:

$$UI = I^2 R + P_F . \quad (11)$$

или

$$U = IR + e , \quad (12)$$

где

$$e = B\omega L^2/2 , \quad (13)$$

т.е. двигатель Фаралея создает для источника напряжения противо-э.д.с. Таким образом, в проводнике, движущемся в неподвижном магнитном поле, создается э.д.с. В нашем случае проводник движется вместе с источником магнитного поля. Но и в этом случае в нем должна создаваться э.д.с., т.к. магнитное поле не перемещается вместе с объектом, его создающим

Из (12) имеем:

$$I = \frac{U - e}{R} , \quad (14)$$

Из (6, 8) имеем:

$$\frac{d\omega}{dt} = (IBL^2/2 - M_H) / J . \quad (15)$$

Очевидно,

$$P_H = M_H \omega . \quad (16)$$

Приведенные уравнения (13-16) позволяют найти все неизвестные, как функции времени, при  $\omega(0) = 0$  - см. рис. 2 при  $L=0.2$ ,  $J=0.02$ ,  $R=0.5$ ,  $U=5.9$ ,  $B=1$ ,  $M_H=0.2$  в системе СИ.

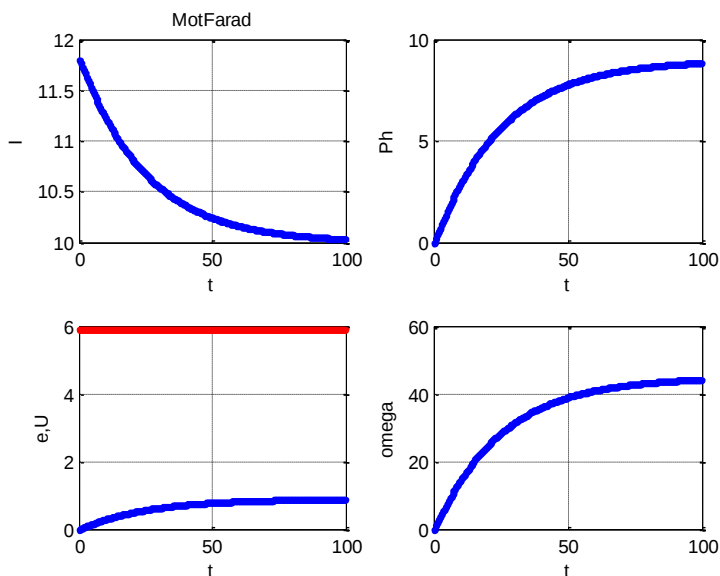


Рис. 2.

В установившемся режиме

$$I = 2M_H / BL^2, \quad (17)$$

$$e = U - IR, \quad (18)$$

$$\omega = 2e / BL^2. \quad (19)$$

Совмещая уравнения (13-15), найдем:

$$\frac{d\omega}{dt} = \left( \frac{\left( U - \frac{BL^2\omega}{2} \right) BL^2}{2R} - M_H \right) / J. \quad (20)$$

или

$$\frac{d\omega}{dt} = -a\omega + d, \quad b = BL^2, \quad a = \frac{b^2}{4RJ}, \quad d = \frac{2bU - 4RM_H}{4RJ}. \quad (21)$$

Следовательно,

$$\omega = \frac{d}{a} (1 - \exp(-at)), \quad (22)$$

$$\omega_{\max} = \frac{d}{a} = \frac{2bU - 4RM_H}{b^2} \quad (22a)$$

и длительность разгона

$$\tau \approx \frac{3}{a} = \frac{12RJ}{b^2} \quad (23)$$

### 3. Моделирование генератора Фарадея

Для моделирования генератора Фарадея воспользуемся принципом обратимости электрических машин.

Предположим, что в генераторе тоже существует сила  $F$  вида (6). В начальный момент она может появиться как результат возникновения тока, вызванного силой Лоренца – в этом случае она должна иметь очень незначительную величину, поскольку экспериментально такой ток не обнаруживается.

Обозначим момент двигателя и момент силы  $F$  как  $M_D, M_F$ .

Тогда

$$M_F \approx FL / 2 = IBL^2 / 2. \quad (31)$$

Мощность, развиваемая силой  $F$ , определена по (10), а мощность двигателя

$$P_D = M_D \omega \quad (32)$$

Используя принцип обратимости электрических машин, запишем по аналогии (20) уравнение закона сохранения момента импульса для генератора:

$$J \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_D}{\omega} - M_F. \quad (33)$$

Следовательно,

$$\frac{d\omega}{dt} = \left( \frac{P_D}{\omega} - M_F \right) / J. \quad (34)$$

Уравнение баланса мощности имеет вид:

$$P_D = I^2 R + P_F. \quad (35)$$

Из (10, 35) находим:

$$P_D = I^2 R + \omega I B L^2 / 2$$

или

$$I^2 R + e I - P_D = 0. \quad (36)$$

где

$$e = \omega B L^2 / 2. \quad (37)$$

Эта формула совпадает с формулой (13) для двигателя и с формулой Тамма [4], полученной иначе. Из (36) следует, что генератор Фаралея является источником тока

$$I = \frac{-e + \sqrt{e^2 + 4RP_D}}{2R}, \quad (38)$$

Напряжение на генераторе

$$U = IR. \quad (39)$$

Электрическая мощность генератора

$$P = UI = I^2 R. \quad (40)$$

Из (34, 31) находим:

$$\frac{d\omega}{dt} = \left( \frac{P_D}{\omega} - I B L^2 / 2 \right) / J. \quad (41)$$

В установившемся режиме находим из (41):

$$\left( \frac{P_D}{\omega} - I B L^2 / 2 \right) = 0. \quad (42)$$

Следовательно, если двигатель вырабатывает мощность  $P_D$  при скорости  $\omega$ , то ток генератора

$$I = 2P_D / \omega B L^2. \quad (43)$$

Приведенные уравнения (37-41) позволяют найти все неизвестные, как функции времени, при данных начальных

условиях  $I(0)=0$ ,  $\omega(0)=\omega_0$  - см. рис. 3 при  $\omega_0=10$ ,  $J=0.02$ ,  $L=0.2$ ,  $R=0.5$ ,  $B=1$ ,  $P_D=11$ ,  $\omega_{\max}=50$  в системе СИ. Функции на рис. 3, указанные слева от окон, перечислены в соответствии с графиками сверху вниз; в скобках указан цвет линии.

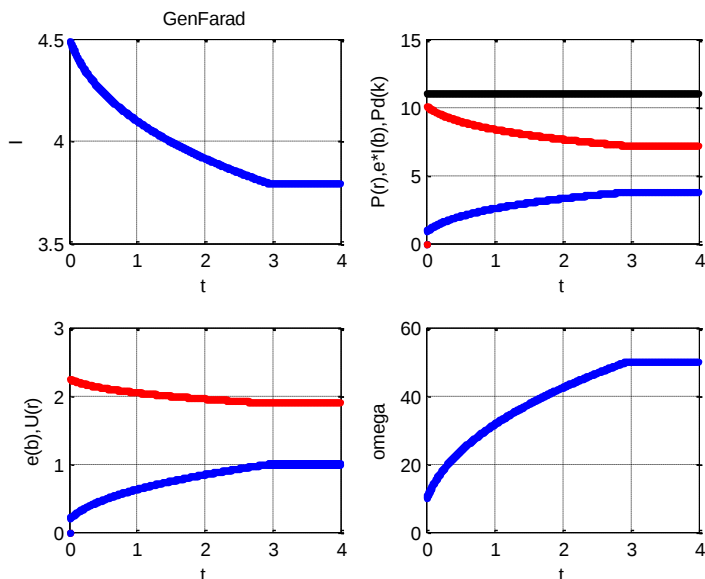


Рис. 3.

Решение этих уравнений существует при данных начальных условиях  $I(0)=0$ ,  $\omega(0)=\omega_0$ . Следовательно, если в некоторый момент при вращении возникнет ток  $I$ , то через некоторое время он резко возрастет, а в дальнейшем начнет уменьшаться вместе с увеличением скорости вращения  $\omega$ . При стабилизации скорости  $\omega=\omega_{\max}$  двигателя (вращающего генератор) ток  $I$  генератора примет значение (43).

Начальный скачок тока может быть обеспечен (как уже говорилось) силой Лоренца. При этом сила  $F$  должна возникнуть как следствие закона сохранения момента импульса.

## Литература

1. Электрические униполярные машины.  
<http://www.vbega.ru/engineering/unipolyar/1/index.html>
2. Хмельник С.И. Сила Хмельника,  
<http://vixra.org/pdf/1407.0075v1.pdf>

3. Хмельник С.И. Силы Лоренца, Ампера и закон сохранения импульса. Количественный анализ и следствия, <http://vixra.org/pdf/1407.0065v1.pdf>
4. Тамм И.Е. Основы теории электричества, Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2003, стр. 547.