

Хмельник С.И.

Принцип обратимости в униполярных машинах Фарадея

Аннотация

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

Оглавление

1. Вступление
 2. Моделирование двигателя Фарадея
 3. Моделирование генератора Фарадея
- Литература

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, ρ - 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,

ϵ - относительная диэлектрическая проницаемость магнита, точнее, той его части, по которой протекает ток,

μ - относительная магнитная проницаемость магнита,

c - скорость света в вакууме.

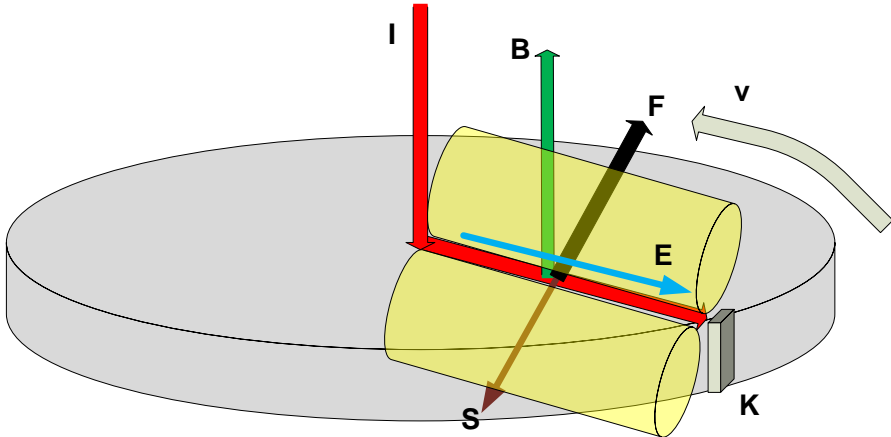


Рис. 1.

В [3] показано, что диэлектрическая проницаемость проводника с током зависит только от μ и ρ :

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

где

μ_0 - магнитная проницаемость вакуума,
 ρ - удельное сопротивление проводника.

Объединяя (1, 3, 4), получаем

$$F = VjB, \tag{5}$$

где

j - плотность тока,
 B - магнитная индукция.

или

$$F = IBL, \tag{6}$$

где

I - ток,
 L - длина радиуса.

Формально эта формула совпадает с формулой силы Ампера, но только формально, т.к. здесь сила приложена к магниту.

Например, при $B = 1[T]$, $j = 4[A/sm^2] = 4 \cdot 10^4[A/m^2]$ из (5) 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,
 ω - 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:

$$J \frac{d\omega}{dt} = Fl - M_H. \tag{7}$$

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),

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

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 Фарадея 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 $L=0.2$, $J=0.02$, $R=0.5$, $U=5.9$, $V=1$, $M_H=0.2$ в системе СИ.

В установившемся режиме

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

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

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

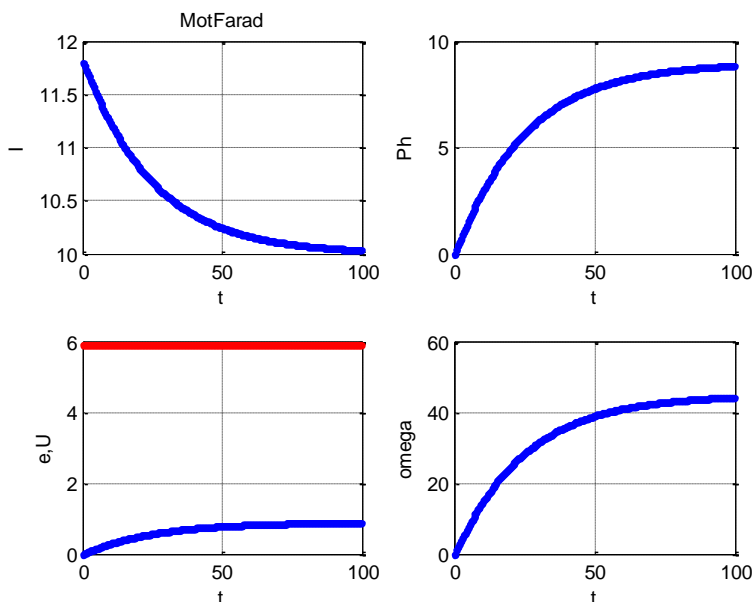


Рис. 2.

Совмещая уравнения (13-15), найдем:

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

или

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

Следовательно,

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

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

и длительность разгона

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

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:

$$P_D = I^2 R + \omega IBL^2/2$$

или

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

где

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

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

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

Напряжение на генераторе

$$U = IR. \tag{39}$$

Электрическая мощность генератора

$$P = UI = I^2R. \tag{40}$$

Из (34, 31) находим:

$$\frac{d\omega}{dt} = \left(\frac{P_D}{\omega} - IBL^2/2 \right) / J. \tag{41}$$

В установившемся режиме находим из (41):

$$\left(\frac{P_D}{\omega} - IBL^2/2 \right) = 0. \tag{42}$$

Следовательно, если двигатель вырабатывает мощность P_D при скорости ω , то ток генератора

$$I = 2P_D / \omega BL^2. \tag{43}$$

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.

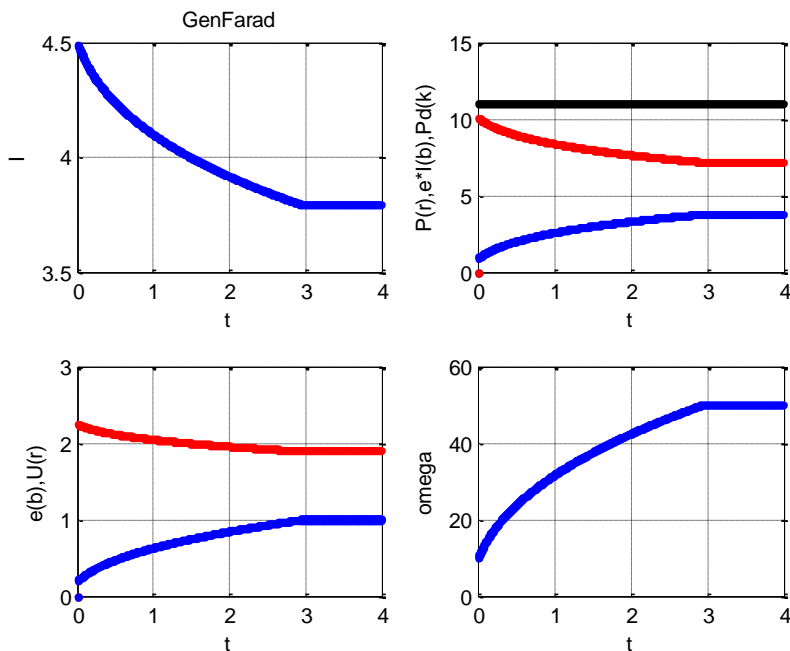


Рис. 3.

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 ω . 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/uniolyar/1/index.html>
2. Хмельник С.И. Сила Хмельника,
<http://vixra.org/pdf/1407.0076v2.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.