

# ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ БЕЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОНТАКТА

Чашко М.В

Донецкий государственный технический университет

ivp@elf.dgtu.donetsk.ua

*Theoretical principles represent of transference electrical energy by means of magnetic stream impulses on mobile object without electrical contact. Theoretical generalization and scientific problem solution execute form in time and space magnetic stream for contact transference of energy.*

Элементная база силовой электроники, появившаяся за последние годы, позволяет создать новую технологию бесконтактной передачи энергии. Если передачу осуществлять импульсами, формируемыми полупроводниковыми ключами в сети постоянного тока или переменного тока промышленной частоты, ее можно реализовать с минимально возможными потерями энергии и расходом материалов. Однако реализации препятствовало отсутствие научных основ такой передачи. В настоящей работе представлены элементы этих основ.

**П о н я т и е .** Устройство бесконтактного электропитания (рис. 1) содержит *тяговую линию* из изолированного проводника (кабеля), размещенную вдоль трассы движения, и *энергоприемник* на движущемся объекте (витки провода с магнитопроводом или без него). При работе устройства ток проходит по тяговой линии, создавая вокруг нее магнитный поток, который индуцирует в энергоприемнике электродвижущую силу (ЭДС), используемую для перемещения движущегося объекта, например, электровоза. Прохождение тока по тяговой линии сопровождается рассеянием энергии в ее сопротивлении и в окружающем пространстве, например, в крепи выработки или в горных породах.



Рисунок 1 - Схема бесконтактной передачи электроэнергии.

теоретические и организованы опытно - конструкторские работы, результатом которых стали несколько опытных партий электровозов с высокочастотным индукционным электропитанием. Особенность его – от одного преобразователя частоты питается вся тяговая линия длиной 1 – 2 км, соответственно, рассеяние энергии происходит на этой длине.

В Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса (США) был создан в 1988 г. электробус с индукционным электропитанием. Линия, заключенная в разомкнутый магнитопровод, обтекается током 800 Гц от преобразователя частоты. Особенность этой системы в большом усилии притяжения транспортной машины к линии, которое увеличивает сопротивление движению в несколько раз.

В 90-х годах в Германии (Мейнс Й., Технический Университет г.Брауншвейг) создана система индукционного электропитания, в которой тяговая линия состоит из секций длиной 30 – 60 м, каждая секция питается от своего преобразователя частоты 60 Гц / 20 кГц. Секции включаются по мере перемещения транспортной машины. Особенность системы в том, что энергия рассеивается только на коротком участке линии, но необходимы две линии передачи энергии – на высокой частоте и на промышленной, и большое количество преобразователей частоты.

Из опыта создания и эксплуатации транспортных машин с бесконтактной передачей энергии следует:

1. Для бесконтактного электропитания существует ниша в электроэнергетике. Ее признаки: условия, при которых электрический контакт ненадежен (например, при высоких скоростях движения); или неизолированная линия может вызвать травматизм или пожар (ограниченные пространства тоннелей, шахтных выработок и т.п.); или неизолированная линия недопустима из-за высокой электропроводности окружающей среды (вода, электропроводная пыль и т.п.).

2. Основными проблемами индукционного бесконтактного электропитания являются рассеяние энергии в тяговой линии при передаче ее током высокой частоты и необходимость в преобразовании тока 50 Гц или постоянного в ток высокой частоты.

3. Научные основы электропитания существуют только для электропитания на высокой частоте, не менее единиц килогерц, и только для тока (магнитного потока), синусоидально изменяющегося во времени.

4. Задача индукционного электропитания движущихся объектов непосредственно от сети промышленной частоты или постоянного тока не только не решена, но и не ставилась.

В ДонГТУ разработаны системы индукционного электропитания непосредственно от сети переменного или постоянного тока. Идеальные предпосылки ее следующие.

Известно, что магнитный поток способен переносить энергию в пространстве, если он изменяется во

времени. Плотность энергии пропорциональна напряженности магнитного поля и скорости изменения его во времени. Преобразование частоты сети в высокую частоту позволяет получить необходимую плотность энергии и, соответственно, приемлемые габариты энергоприемника, но требует больших габаритов преобразователя. Поэтому в настоящей работе выбран другой путь - прерывать ток линии, создавая импульсы магнитного потока. Его преимущества:

1) В импульсе плотность потока энергии максимально возможная т.к. максимальна скорость изменения магнитного потока.

2) Импульсы создаются полупроводниковыми элементами, работающими в режиме ключа, поэтому энергии выделяется на два порядка меньше, чем в преобразователе частоты. Следствием этого являются минимальные габариты и возможность расположить ключи вдоль линии, так чтобы создавать импульсы на участке ограниченной длины.

В первой системе (рис. 2) линия состоит из секций длиной 100 – 200 м, которые включаются по мере перемещения транспортной машины так, что в линии ток проходит импульсами.

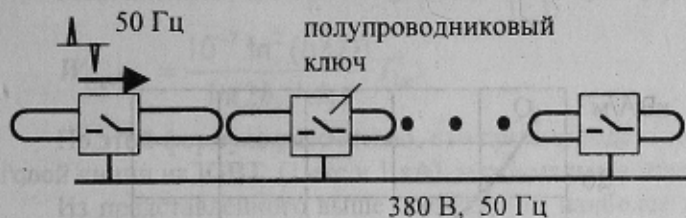


Рисунок 2 - Схема индукционного электропитания импульсами 50 Гц.

Во второй системе (рис. 3) в линию постоянного или переменного тока включены ключи, функции которых выполняют полупроводниковые модули. Ключи создают импульсы магнитного потока на участке линии, где находится транспортная машина.

Особенность этих систем – на большей части линии энергия не рассеивается в пространство; плотность потока энергии, исходящего от линии, максимально возможная.

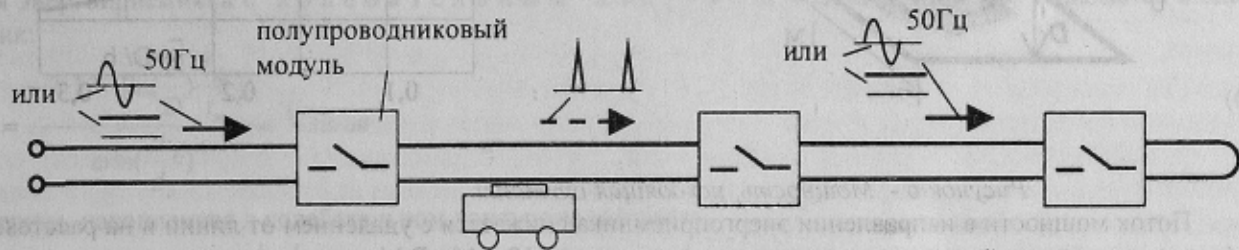
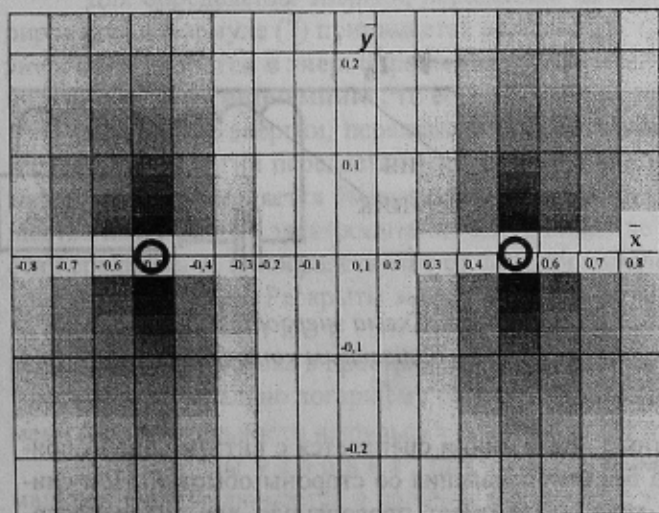


Рисунок 3 - Схема индукционного электропитания импульсами произвольной частоты.

Закономерности распределения в пространстве импульсного потока магнитной энергии между тяговой линией и энергоприемником представлены формулой (1), графически - рис. 4.

$$S_{1y} = -\frac{10^{-7}}{4\pi} \cdot \frac{\partial i^2}{\partial t} \cdot \frac{\partial}{\partial y} \left( \ln^2 \frac{(\bar{x} - 0,5)^2 + \bar{y}^2}{(\bar{x} + 0,5)^2 + \bar{y}^2} \right), \quad (1)$$

где  $\bar{x} = x/b$ ,  $\bar{y} = y/b$ ,  $b$  – расстояние между ветвями линии.



S	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
---	---	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Рисунок 4 - Плотность потока мощности

Из рисунка видно, что плотность потока имеет максимумы возле ветвей тяговой линии; ширина основной части потока приблизительно 0,2b; с удалением от ветви линии поток существенно уменьшается и незначительно расширяется.

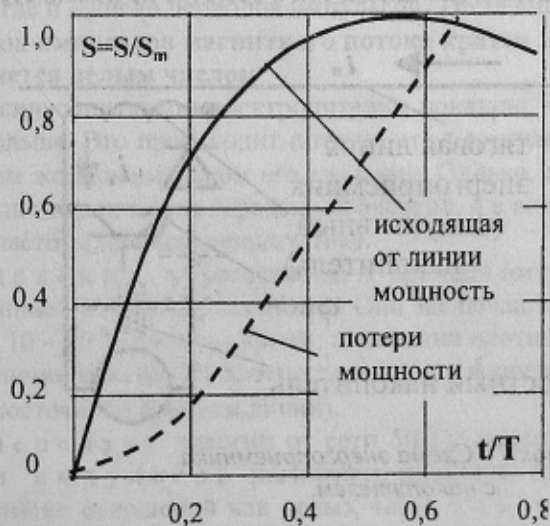


Рисунок 5 - Зависимость мощности от длительности фронта импульса.



В функции времени плотность потока мощности изменяется в соответствии с формулой

$$S(t) = 5 \cdot 10^{13} k(x, y) \frac{E_c^2 T}{\ln^2(b/d)} (1 - e^{-t/T}) e^{-t/T} \quad (2)$$

Тут символом  $k(x, y)$  заменена зависимость от координат  $x$  и  $y$ ;  $E_c$  – напряженность сторонних электрических полей – созданного сетью, и индуцированного энергоприемником, В/м;  $\gamma$  – проводимость проводника линии, См/м;  $d$  – диаметр линии, м.  $T = 2 \cdot 10^{-7} s \gamma \ln(b/d)$  – электромагнитная постоянная времени линии, с;  $s$  – сечение проводника линии, м<sup>2</sup>. Из-за поверхностного эффекта оно может не совпадать с сечением линии.

Зависимость (2) изображена на рис. 5. Плотность потока достигает максимального значения при длительности фронта импульса около 0,7 постоянной времени линии. Но с увеличением фронта растут потери мощности в омическом сопротивлении линии (пунктирная кривая), поэтому импульсы с длительным фронтом оказываются энергетически неэкономичными. Мощность, которая может быть передана энергоприемнику, оценивается как поток через плоскость, имеющую длину 1 м вдоль линии и ширину от  $x_1 = 0,2$  до  $x_2 = 0,8$ , на расстоянии  $y$  от линии.

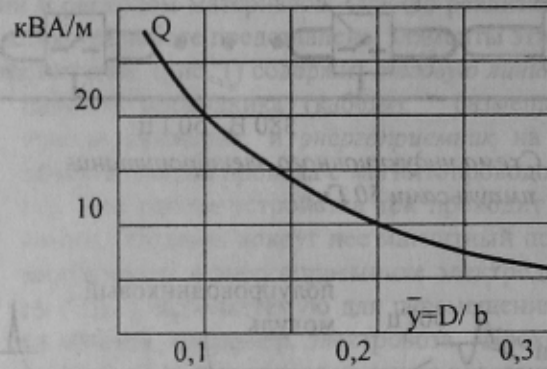
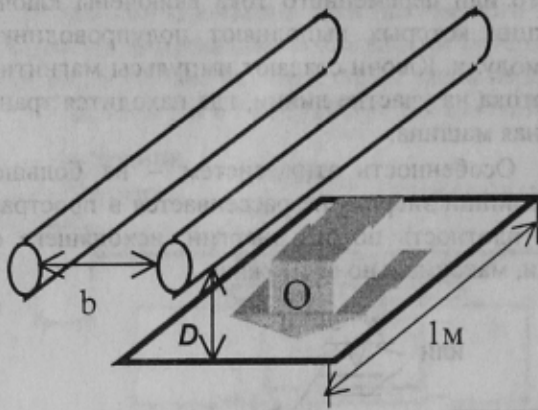


Рисунок 6 - Мощность, исходящая от линии.

Поток мощности в направлении энергоприемника снижается с удалением от линии и на расстоянии 2 – 5 см (возможное расстояние до энергоприемника) составляет 10 – 15 кВА/м.

Далее определяется количество энергии, которое может принять энергоприемник.

Непрерывное условие импульсной технологии электропитания – возможность накопления энергии в энергоприемнике, так как привод является для импульса большим сопротивлением и в привод энергия должна подаваться непрерывно. Автором разработаны два варианта: энергия накапливается

- 1) в статическом накопителе (в индуктивности или емкости) и
- 2) в колебательном контуре.

В первом варианте (рис. 7) при возрастании тока в линии  $i_n$  в обмотке индуцируется ЭДС полярностью непроводящей для диода, ток в обмотке не изменяется,

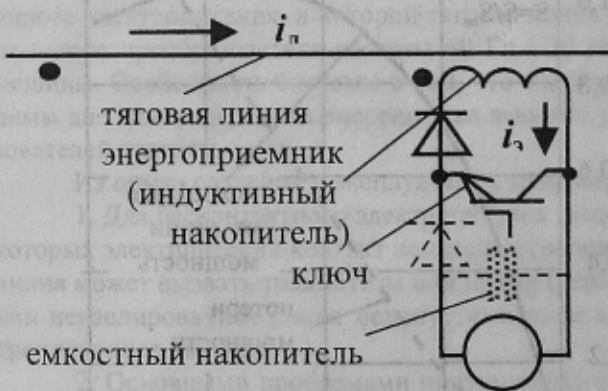


Рисунок 7 - Схема энергоприемника с накопителем.

обмотка. Он создает магнитный поток, который содержит энергию, перешедшую из линии в энергоприемник. Энергия накапливается в емкости или индуктивности и в привод поступает из накопителя.

Во втором варианте (рис. 8) конденсатор образует с обмоткой энергоприемника колебательный контур, в котором циркулирует ток с собственной частотой контура, в общем случае отличной от частоты импульсов. Импульсы магнитного потока линии индуцируют в обмотке ток, который подзаряжает конденсатор. Привод берет энергию от колебательного контура в необходимом ему количестве.

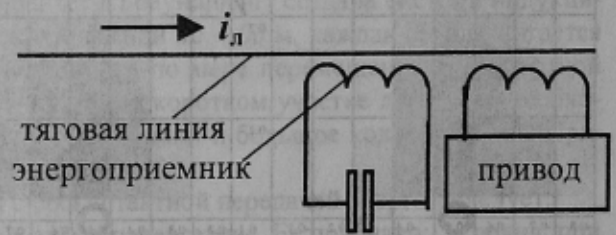


Рисунок 8 - Схема энергоприемника с колебательным контуром.

магнитный поток линии сцепляется с витками энергоприемника без сопротивления со стороны обмотки. При снижении тока ЭДС имеет проводящую для диода полярность, протекает ток ( $i_s$ ) по цепи обмотка – ключ – диод –

Для энергоприемника со статическим накопителем мощность, переданная в энергоприемник:

$$Q_{2м} = 10^{-7} \ln\left(\frac{b_2}{d_2}\right) \frac{\partial i_2^2}{\partial t} \quad (3)$$

Энергия, накопленная в энергоприемнике за импульс (на 1 м его длины):

$$W_{2м} = \frac{10^{-7} \ln^2(b/D)}{\ln(2b_2/d_2)} I_{1м}^2 \frac{T_2^2}{t_0^2} (1 - e^{-t_0/T_2})^2 \quad (4)$$

Тут  $b$  и  $b_2$  – расстояния между ветвями линии и энергоприемника,  $d_2$  – диаметр обмотки энергоприемника,  $D$  – расстояние между энергоприемником и линией,  $I_{1м}$  – максимальное значение тока линии в импульсе,  $T_2$  – электромагнитная постоянная времени энергоприемника,  $t_0$  – длительность импульса.

Максимальное значение  $W_{2м}$  имеет место при  $T_2/t_0 \rightarrow \infty$ :

$$W_{2м\max} = \frac{10^{-7} \ln^2(b/D)}{\ln(2b_2/d_2)} I_{1м}^2 \quad (5)$$

По этой формуле рассчитано, что при периоде и токе импульсов, которые может обеспечить коммутатор тяговой линии на IGBT (1 мкс и 1 кА), максимальная мощность имеет порядок  $10^5$  ВА/м.

Из представленного выше следует, что наиболее существенным параметром энергоприемника является его электромагнитная постоянная времени. Для эффективной передачи энергии постоянная времени энергоприемника должна быть на порядок больше длительности импульса магнитного потока линии, максимальная же эффективность достигается со сверхпроводящей обмоткой.

Для энергоприемника с колебательным контуром мощность, которая передается в энергоприемник:

$$Q_2 = \frac{-2 \cdot 10^{-7} \left[ \ln\left(\frac{b}{D}\right) \frac{I_{1м}}{t_u} \right]^2}{\omega \ln\left(\frac{2b_2}{d_2}\right)} e^{-\frac{t}{T_2}} \sin \omega t \quad (6)$$

Энергия, накопленная в колебательном контуре за импульс:

$$W_{2к} = \int_0^{t_u} Q_2 dt = \frac{2 \cdot 10^{-7} \left[ \ln\left(\frac{b}{D}\right) \frac{I_{1м}}{t_u} \right]^2}{\ln\left(\frac{2b_2}{d_2}\right) \omega^2} (1 - \cos \omega t) e^{-2t/T_2} \quad (7)$$

Из формулы (7) видно, что значение накопленной энергии максимально при  $t_u = T_k/2$ . То есть, максимальное количество энергии передается, когда длительность импульса равна половине периода собственных колебаний контура.

Для определения энергии, переданной за неограниченный промежуток времени, верхний предел интегрирования в формуле (7) принимается равным  $t = t_u + nT_u$ , где  $n$  – число периодов импульсов. Тогда видно, что энергия передается в энергоприемник, только если период импульсов магнитного потока кратен периоду колебаний энергоприемника, то есть, их отношение является целым числом.

Сравнение энергии, переданной при импульсном и синусоидальном электропитании показало, что при импульсном энергии передается приблизительно на 30% больше. Это происходит потому, что в импульсе магнитный поток изменяется быстрее, чем в синусоиде, при том же максимальном его значении. Однако, преимущество импульсного электропитания автор видит не в большем количестве переданной энергии, а в возможности передавать ее непосредственно от сети промышленной частоты или постоянного тока.

**Выводы.** Раскрыты закономерности распределения в пространстве и времени импульсного потока магнитной энергии и между тяговой линией и энергоприемником. Они заключаются в локализации этого потока в пространстве на участке шириной 10 – 20 % ширины линии; изменении плотности потока пропорционально логарифму расстояния до линии; наличии максимума плотности потока в функции времени (при длительности импульса  $\approx 0,7$  электромагнитной постоянной времени линии).

Определены условия, при которых возможна передача энергии от сети 50 Гц транспортной машине. Они заключаются в наличии длительности импульсов магнитного потока не большей, чем полупериод колебаний тока в энергоприемнике, и наличии отношений как целых чисел частот импульсов магнитного потока, тока в энергоприемнике и тока сети 50 Гц. При этом колебательный контур приемника должен обладать запасом энергии на порядок больший энергии импульса.