

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ПОДВИЖНЫЙ ОБЪЕКТ ИМПУЛЬСАМИ МАГНИТНОГО ПОТОКА

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.*

Работа посвящена передаче электрической энергии без электрического контакта, электромагнитной индукцией, на подвижный объект, например, локомотив с электрической тягой. Цель – оценить возможные потери энергии и коэффициент полезного действия при передаче электрической энергии на транспортную машину импульсами магнитного потока.

Элементная база силовой электроники, появившаяся за последние годы, позволяет создать новую технологию бесконтактной передачи энергии - импульсами, формируемыми полупроводниковыми ключами в сети постоянного тока или переменного тока промышленной частоты. Ее 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 линию постоянного или переменного тока включены ключи, функции которых выполняют полупроводниковые модули (рис. 1). Ключи создают импульсы магнитного потока на участке линии, где находится транспортная машина.

Особенность этой системы в том, что на большей части линии энергия не рассеивается в пространство и плотность потока энергии, исходящего от линии, максимально возможная.

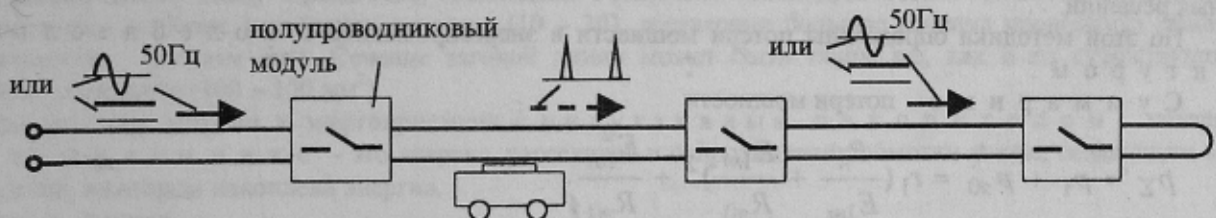


Рисунок 1 - Схема индукционного электропитания импульсами произвольной частоты

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. 2) при возрастании тока в линии  $i_n$  в обмотке индуцируется ЭДС полярностью



Рисунок 2 - Схема энергоприемника с накопителем

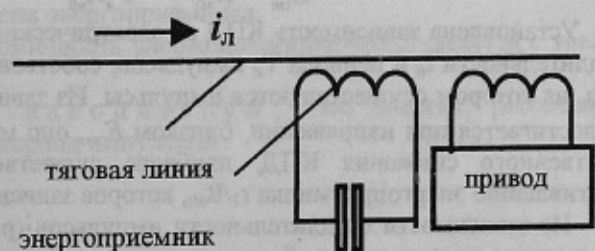


Рисунок 3 - Схема энергоприемника с колебательным контуром.

непроводящей для диода, ток в обмотке не изменяется, магнитный поток линии сцепляется с витками энерго-

приемника без сопротивления со стороны обмотки. При снижении тока ЭДС имеет проводящую для диода полярность, протекает ток ( $i_s$ ) по цепи обмотка – ключ – диод – 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. 3) 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 индуктируют в обмотке ток, который подзаряжает конденсатор. Привод берет энергию от колебательного контура в необходимом ему количестве.

Задача оценки энергетической эффективности передачи энергии импульсами магнитного потока – установить соотношение энергий переданной энергоприемнику и рассеянной при передаче. Это соотношение характеризуется КПД – отношением переданной мощности к сумме переданной и потерянной. В рамках решения задачи 1) разработана методика исследования; 2) установлены аналитические зависимости между переданной энергией, потерянной энергией и размерами линии и энергоприемника; 3) определены условия, при которых потери минимальны и КПД максимально возможный.

Природа перемещения энергии в пространстве такова, что потери её тем больше, чем более неравномерен поток энергии. Передача энергии импульсами предполагает существенную неравномерность потока, поэтому следовало ожидать повышенные потери по сравнению с другими способами передачи. Противоречие между возможностями импульсной передачи энергии и необходимостью ее терять автор разрешает: 1) сокращением длительности импульса во времени, 2) сокращением длины участка линии, на котором существуют импульсы, 3) увеличением напряжения электрического тока в импульсе. Для определения зависимости между указанными величинами и потерями энергии выполнено аналитическое исследование процесса передачи энергии импульсами в аппарате теории электрических цепей.

Известные методики исследования импульсных процессов оказались неприемлемыми. Сущность их в том, что складываются реакции объекта на ряд гармоник, на которые разложен импульс, либо реакции на ряд импульсов. Однако результат выражается большим количеством слагаемых, и его невозможно интерпретировать без потери адекватности выводов.

Сущность методики, предложенной автором, в том, что процесс анализируется на отрезке времени, равном одному периоду, а периодичность используется для определения начальных условий. Во время паузы между импульсами процесс описывается линейным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами, общее решение которого известно. Начальные значения напряжения и фазы определены из условия, что в начале каждого периода они имеют такое же значение, что и в конце, плюс импульс. Это даёт возможность определить амплитуду и фазу колебаний как функцию импульса. При произвольной форме импульса он представляется состоящим из совокупности элементарных импульсов, а решение представляет собой интеграл элементарных решений.

По этой методике определены потери мощности в энергоприемнике с колебательным контуром.

Суммарные потери мощности

$$P_{\Sigma} = P_1 + P_{\Sigma 0} = r_1 \left( \frac{P_n}{E_{1m}} + \frac{E_{1m}}{R_{\Sigma 0}} \right)^2 + \frac{E_{1m}^2}{R_{\Sigma 0}} \quad (1)$$

$$\text{Они минимальны при } E_{1m \min} = 4 \sqrt{\frac{r_1 P_n^2}{r_1 / R_{\Sigma 0}^2 + 1 / R_{\Sigma 0}}} \quad (2)$$

КПД электропитания с передачей энергии в колебательный контур

$$\eta_{\text{кк}} = \frac{P_n}{P_n + P_{\Sigma}} = \frac{1}{1 + r_1 \left( \frac{P_n}{E_{1m}} + \frac{E_{1m}}{R_{\Sigma 0}} \right)^2 + \frac{E_{1m}^2}{P_n R_{\Sigma 0}}} \quad (3)$$

Установлена зависимость КПД от электрических, временных и геометрических параметров: напряжения  $E_{1m}$ , длительности  $t_n$  и периода  $T_n$  импульсов, собственной частоты колебательного контура  $T_k$ , длины участка линии, на котором осуществляются импульсы. Из зависимости от напряжения (рис. 4) следует, что КПД более 80% достигается при напряжении, близком  $E_{1m}$ , оно может изменяться в широких пределах ( $\approx 0,8 + 1,6 E_{1m}$ ) без существенного снижения КПД, наиболее существенным является отношение сопротивления линии к сопротивлению энергоприемника  $r_1/R_{\Sigma 0}$ , которое зависит от периода и длительности импульса.

Из зависимости от длительности импульсов (рис. 5) следует, что максимальный КПД достигается при длительности импульса, приблизительно равной половине периода колебаний контура энергоприемника. Период должен принимать только дискретные значения  $T_n = N \cdot T_k$  (рис. 6), с увеличением периода КПД снижается, наибольшее его значение может быть достигнуто при равенстве частот импульсов и колебаний энергоприемника ( $N=1$ ).

Зависимость КПД от длины секции линии, на которой осуществляются импульсы, представлена на рис. 7

для разных значений зазора  $D$  между линией и энергоприемником. Видно, что увеличение зазора и увеличение

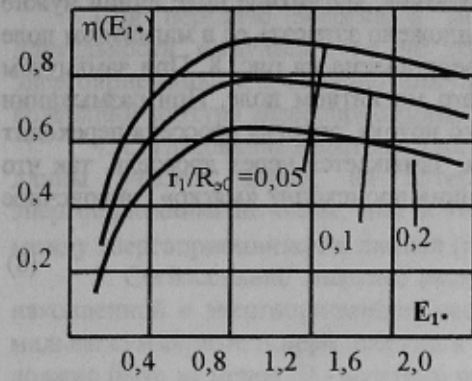


Рисунок 4 - Зависимость КПД от напряжения в импульсе

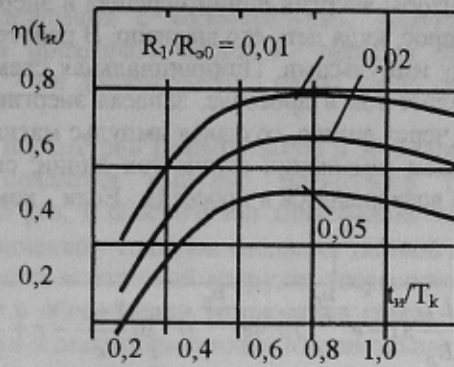


Рисунок 5 - Зависимость КПД от длительности импульса.

длины линии уменьшают КПД в одинаковой мере: увеличение зазора в три раза приводит к такому же снижению КПД, что и удлинение в три раза секции линии.

Следовательно, для получения высокого КПД необходимо обеспечить параметры импульса: напряжение, пропорциональное корню квадратному из мощности нагрузки, длительность импульса, равную

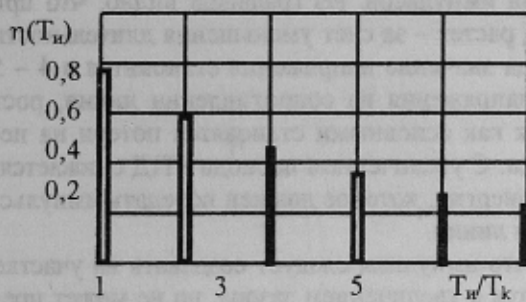


Рисунок 6 - Зависимость КПД от периода импульсов.

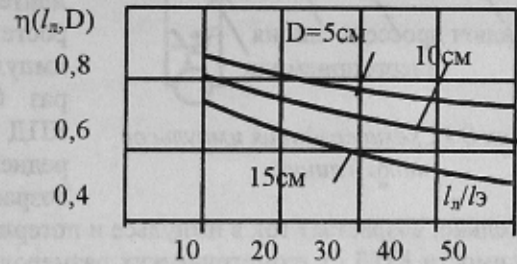


Рисунок 7 - Зависимость КПД от длины линии энергоприемника

половине периода собственных колебаний контура, и отношение частоты импульсов к частоте колебательного контура, равное целому числу. Кроме того, необходимо обеспечить соотношение длин секции тяговой линии и энергоприемника не более нескольких десятков (10 – 30), достаточно большое сечение проводника обмотки энергоприемника (десятки  $\text{см}^2$ ). Сечение тяговой линии может быть таким же, как и на существующем контактном транспорте (100 – 150  $\text{мм}^2$ ).

При передаче энергии в энергоприемник с индуктивным накопителем потери в энергоприемнике - это энергия, рассеянная в сопротивлении обмотки током, создающим магнитный поток, в котором накоплена энергия.

Потери энергии

$$w_{\text{э}} = 20P_{\text{н}} \frac{T_{\text{н}}^2}{T_{\text{э}}}, \quad (4)$$

а КПД энергоприемника

$$\eta_{\text{э}} = \frac{1}{20 \frac{T_{\text{н}}}{T_{\text{э}}} + 1}, \quad (5)$$

где  $T_{\text{э}} = L_{\text{э}}/R_{\text{э}}$  - электромагнитная постоянная времени энергоприемника.

Из формулы (5) следует, что энергетическая экономичность энергоприемника увеличивается с увеличением его постоянной времени и частоты импульсов.

Потери в энергоприемнике с емкостным накопителем - это энергия, рассеянная в омическом сопротивлении обмотки энергоприемника за период импульсов.

$$w = P_{\text{н}} T_{\text{н}} \frac{\sqrt{L_{\text{э}} C}}{2T_{\text{э}}}; \quad \eta = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{L_{\text{э}} C}}{2T_{\text{э}}}} \quad (6)$$

Из выражения (6) следует, что КПД энергоприемника увеличивается с увеличением электромагнитной постоянной времени энергоприемника - как и при индуктивном накопителе энергии. Увеличение емкости уменьшает КПД из-за большей длительности протекания тока через сопротивление обмотки, поэтому емкость не следует принимать больше необходимой:

$$\frac{CU^2}{2} = 10P_u T_u \Rightarrow C = \frac{20P_u T_u}{U^2} \quad (7)$$

Потери в л и н и и . Чтобы энергия линии перешла в энергоприемник, магнитное поле линии нужно удалить, при этом возникает вопрос, куда деть его энергию. В работе предложено запастись ее в магнитном поле дросселя на время паузы между импульсами. Принципиальная схема представлена на рис. 8. При замкнутом ключе напряжение питания создает ток в дросселе, запасая энергию в его магнитном поле. При размыкании ключа ток дросселя замыкается через линию, создавая импульс магнитного потока, энергия дросселя переходит в энергию линии. При следующем замыкании ключа ток линии, спадая, замыкается через дроссель, так что энергия магнитного поля линии возвращается в дроссель. Если коммутация происходит «мягко», за конечное время, КПД передачи

$$\eta = \frac{1}{(1 + 20 \frac{T_u}{T_s}) [1 + k_c^2 (1 + \frac{L_d}{L_s}) (1 - e^{-\frac{2t_n}{T_r}}) + 4e^{-\frac{2t_n}{T_r}} (r^2 \ln \frac{1+r}{r} - r + \frac{1}{2})]} \quad (8)$$



Рисунок 8 - Схема создания импульсов тока в линии

$$k_c^2 = \frac{L_d L_s}{M^2}; \quad r = -\frac{U}{R_d I_{03}}$$

На рис. 9 представлена его зависимость от напряжения, длительности и периода импульсов. Из графиков видно, что при росте напряжения КПД растет – за счет уменьшения длительности импульса тока. Но когда значение напряжения становится в 4 – 5 раз больше падения напряжения на сопротивлении линии, рост КПД прекращается, так как основными становятся потери на переднем фронте импульса. С увеличением периода КПД снижается: возрастает количество энергии, которое должен передать импульс, следовательно, возрастает ток в импульсе и потери на сопротивлении линии.

Из зависимости КПД от геометрических размеров (рис. 10) видно, что импульсы следует создавать на участке линии длиной не более 10 – 20 длин энергоприемника. КПД снижается с увеличением зазора, но не может превысить 80% даже при касании энергоприемником тяговой линии.

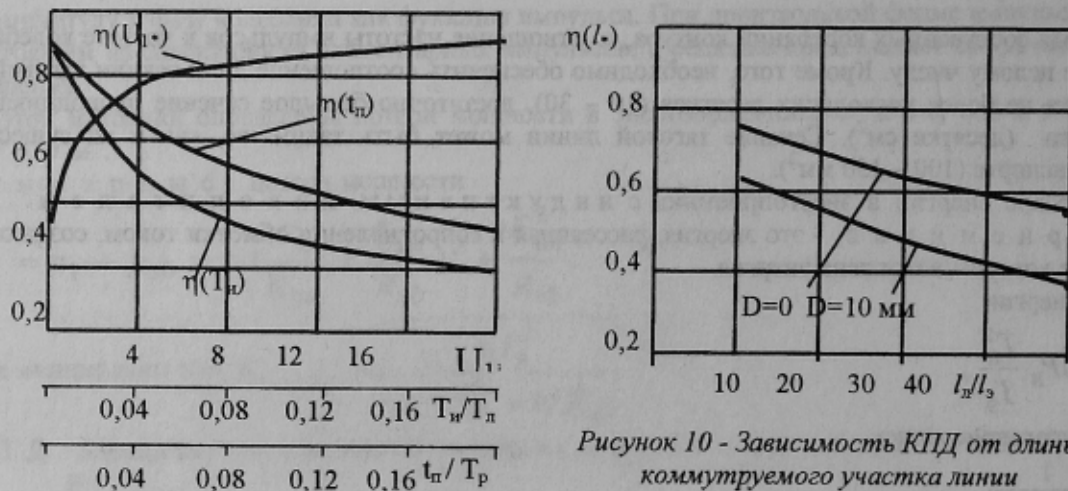


Рисунок 10 - Зависимость КПД от длины коммутруемого участка линии

Рисунок 9 - Зависимость КПД от параметров импульса

#### Выводы.

1. Возможна достаточно эффективная (с КПД до 0,8) передача энергии от тяговой линии энергоприемнику магнитным потоком, без электрического контакта. Для этого необходимо: передавать энергию импульсами магнитного потока во времени и локализовать его в пространстве; согласовать временные параметры импульса, тяговой линии и энергоприемника; согласовать пространственные параметры тяговой линии и энергоприемника; обеспечить согласование количества энергии, расходуемой в приводе, с количеством энергии, запасенной в энергоприемнике и передаваемой импульсом.

2. Согласование временных параметров импульса и тяговой линии состоит в ограничении длительности периода импульсов значением  $10^{-2} - 10^{-3}$  электромагнитной постоянной времени линии, ограничением длительности паузы между импульсами  $10^{-2} - 10^{-3}$  электромагнитной постоянной цепи линия – дроссель.

3. Согласование временных параметров импульса и энергоприемника состоит в обеспечении минимально возможной постоянной времени энергоприемника при нарастании магнитного потока в импульсе (ограничение – предельно допустимое напряжение коммутатора энергоприемника) и обеспечении максимально возможной

постоянной времени энергоприемника при снижении магнитного потока в импульсе (ограничение – площадь сечения проводника обмотки энергоприемника).

При передаче энергии в энергоприемник с колебательным контуром добавляется требование о длительности импульса: она не должна превышать половины периода собственных колебаний контура энергоприемника и о периоде импульсов – он должен быть в целое число раз больше периода собственных колебаний контура энергоприемника.

4. Согласование пространственных параметров тяговой линии и энергоприемника состоит в обеспечении длины участка линии, на которой создается импульс магнитного потока, превышающим длину энергоприемника не более, чем в 10 – 15 раз, и обеспечении минимально возможного немагнитного зазора между энергоприемником и линией (ограничение – толщина изоляции тяговой линии  $\approx 10$  мм).

5. Согласование энергии, расходуемой в полезной нагрузке энергоприемника, с количеством энергии, накопленной в энергоприемнике, состоит в обеспечении напряжения (тока) в импульсе, при котором минимальны суммарные потери энергии в линии и энергоприемнике. Минимальное количество запасенной энергии должно быть не менее 10 - кратного расхода в полезной нагрузке за период импульсов.