

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕСКОНТАКТНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Чашко М.В., Демченко Г.В.

Донецкий национальный технический университет

ivp@elf.dgtu.donetsk.ua

The article is devoted to research of transfer of electrical energy without electrical contact - electromagnetic field. The urgency of work is caused by advantages contactless of the power supplies: by increase of reliability, absence sparking, opportunity to abolish above the ground an infrastructure of an electrical network and advantages of computer modeling. The given material can be used at designing miner electric locomotive.

Работа посвящена исследованию передачи электрической энергии без электрического контакта – электромагнитным полем. Актуальность работы обусловлена достоинствами бесконтактного электропитания: повышением надежности, отсутствием искрения, возможностью упразднить надземную инфраструктуру электрической сети. И достоинствами компьютерного моделирования: повышением производительности исследований и отсутствием затрат времени и денег на создание экспериментального оборудования.

Известные системы бесконтактного электропитания различаются способом изменения во времени магнитного потока, которым передается энергия: синусоидально [1,2] или импульсами [3]. Каждый из этих способов имеет теоретическое и экспериментальное обоснование работоспособности, но не решен вопрос - при каком изменении во времени магнитного потока выше КПД. Это обусловило цель работы – определить энергетическую эффективность (потери энергии и КПД) при указанных способах передачи ее магнитным потоком.

Для достижения цели решены задачи: составить компьютерную модель, проверить ее адекватность и определить на модели, какие потери энергии происходят при индукционном электропитании.

Устройство бесконтактного электропитания (рис. 1) содержит тяговую линию из изолированного проводника (кабеля), размещенную

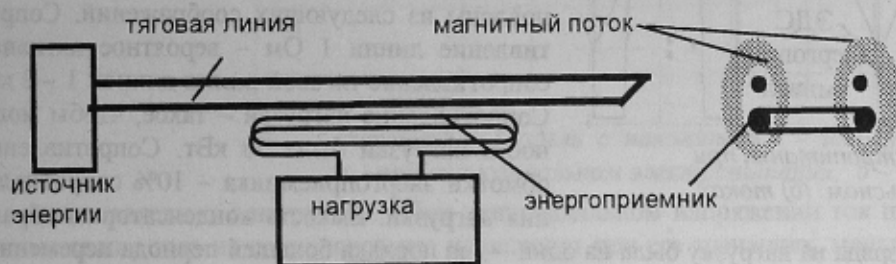


Рисунок 1 - Схема индукционного электропитания

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.

Моделирование выполнено в программе Electronics Workbench 5.0с.

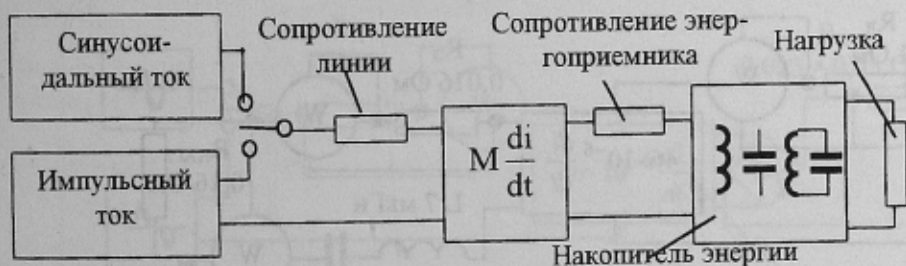


Рисунок 2 - Компьютерная модель индукционного электропитания

Модель (рис. 2) содержит источник питания, тяговую линию, энергоприемник, накопитель энергии в цепи энергоприемника, нагрузку, измерительные приборы. Источников энергии два. Один обеспечивает переменное синусоидальное напряжение, амплитуда и частота которого может быть задана. Второй имитирует напряжение, изменяющееся во времени импульсами. Предусмотрено задание наибольшего значения, длительности и периода импульсов. Линия подключается к одному из источников посредством ключа, управляемого с клавиатуры компьютера.

Тяговая линия имитируется резистором. Реальная линия имеет существенную индуктивность, но так как она не влияет на потери мощности, решено индуктивностью пренебречь. В реальных схемах включены конденсаторы продольной компенсации, так что в рамках решаемой задачи допущение об отсутствии индуктивности следует считать приемлемым.

Взаимоиндукция между линией и обмоткой энергоприемника имитируется дифференцирующим звеном с передаточным коэффициентом, так что оно осуществляет функцию

$$e_2 = M \frac{di_1}{dt}, \quad (1)$$

где  $e_2$  – ЭДС, индуцируемая в обмотке энергоприемника током линии,  
 $M$  – коэффициент взаимной индукции,  
 $i_1$  – ток линии (мгновенное значение).

Передача энергии импульсами более эффективна, если импульсы энергии поступают в накопитель в виде емкости, индуктивности или колебательного контура, а не непосредственно в нагрузку. Соответственно модель предусматривает в цепи энергоприемника указанные виды накопителей и нагрузку в виде резистора. Для возможности накапливания энергии в емкости или индуктивности ток энергоприемника выпрямляется диодами.

В качестве измерительных приборов использованы осциллограф и ваттметр. Осциллограф – штатный осциллоскоп библиотеки Electronics Workbench 5.0с. Ваттметр создан из элементов библиотеки - множительного звена и преобразователя тока в напряжение. На вход  $x$  подается напряжение измеряемой цепи, на вход  $y$  – напряжение, пропорциональное току. Их произведение на выходе множителя измеряется вольтметром постоянного тока. Этот прибор был поверен сравнением показаний с расчетом для синусоидального и импульсного токов. Отклонения не превысили 3% и признаны приемлемыми.

При работе модели источник напряжения создает ток в линии – резисторе. Имитация ЭДС обмотки энергоприемника создается элементом программы «производная по времени» с коэффициентом, которым задается значение взаимной индукции. На его вход подается напряжение, пропорциональное току линии, так что выход представляет собой  $e_2$ , соответствующее формуле (1). Осциллограммы токов линии и представлены на рис. 3 в масштабе ток – 100 А/дел., ЭДС – 100 В/дел. Видно, что при одинаковых максимальных значениях токов ЭДС при импульсном питании существенно больше.



Рисунок 3 - Параметры электропитания при синусоидальном (а) и импульсном (б) токах

ЭДС подключена к накопителю через резистор, имитирующий сопротивление вторичной цепи энергоприемника. Нагрузка, также в виде резистора, подключена к накопителю.

Значения численных параметров установлены из следующих соображений. Сопротивление линии 1 Ом – вероятное активное сопротивление тяговой линии длиной 1 – 2 км. Сопротивление нагрузки – такое, чтобы мощность нагрузки была 50 кВт. Сопротивление обмотки энергоприемника – 10% сопротивления нагрузки. Емкость конденсатора выбрана

такой, чтобы постоянная времени разряда на нагрузку была на один – два порядка большей периода переменного тока.

Контролировались формы тока в линии и напряжения на нагрузке – осциллографом, потери мощности в линии и во вторичной цепи энергоприемника, мощность, переданная нагрузке - ваттметрами. Ниже (рис. 4÷6) представлены схемы, моделирующие бесконтактное электропитание и результаты моделирования.

Схема с колебательным контуром (рис. 4) содержит емкость и индуктивность, настроенные в резонанс с

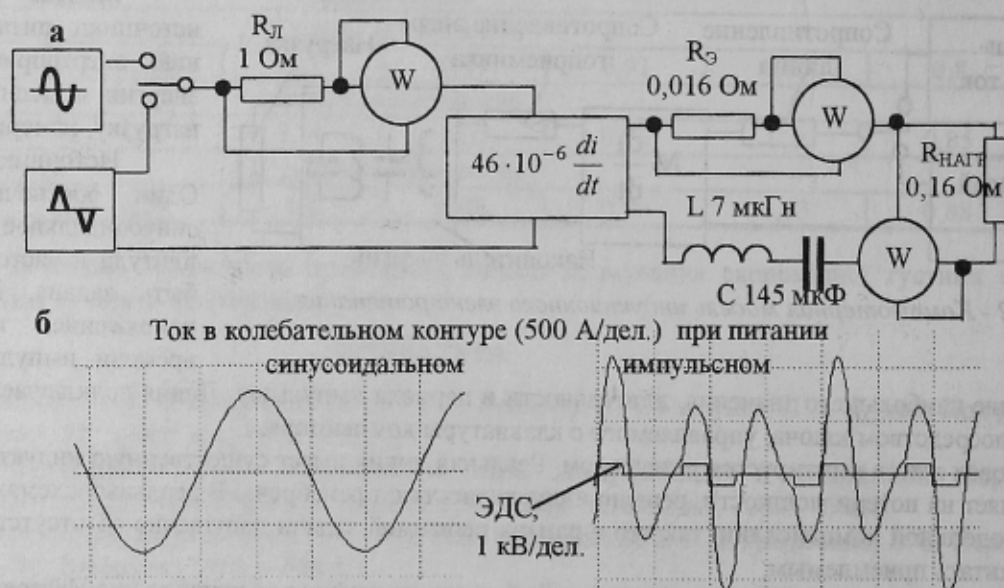


Рисунок 4 – Модель с колебательным контуром:  
а – схема, б – осциллограммы токов

током линии (5 кГц). Ток через сопротивление энергоприемника и нагрузку один и тот же. При синусоидальном токе линии он изменяется синусоидально, при импульсном - по зависимости

$$i = I_m e^{-\frac{L}{R}t} \sin \omega t, \quad (2)$$

где  $L, R$  и  $\omega=2\pi f$  - соответственно индуктивность, суммарное сопротивление и частота колебательного контура.

Ток в контуре изменяется с собственной частотой, амплитуда его затухает в паузе между импульсами, во время импульса амплитуда увеличивается до наибольшего значения. Потери мощности в энергоприемнике и мощность нагрузки обусловлены одним и тем же током и пропорциональны, потери мощности в линии при импульсном питании меньше из-за меньшей длительности протекания тока.

Схема с накоплением энергии в индуктивности (рис. 5) содержит индуктивность, соединенную

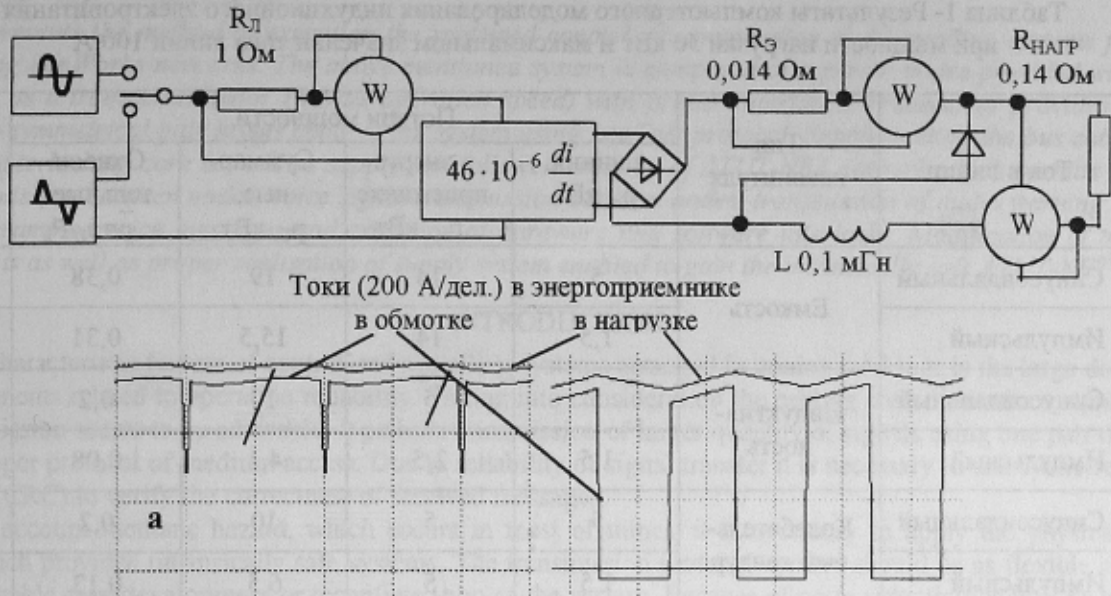


Рисунок 5 - Модель с накопителем - индуктивностью:  
а - при синусоидальном электропитании, б - при импульсном

последовательно с нагрузкой. При синусоидальном напряжении ток практически непрерывен, кратковременные спады тока на осциллограмме происходят при его значениях, меньших тока через индуктивность. При импульсном питании во время импульса ток проходит через сопротивление, индуктивность и нагрузку, во время паузы - только через индуктивность и нагрузку. Такое распределение тока во времени обуславливает снижение потерь мощности в сопротивлении обмотки энергоприемника при импульсном питании по сравнению с синусоидальным.

Схема с накоплением энергии в емкости (рис. 6) содержит конденсатор, включенный параллельно

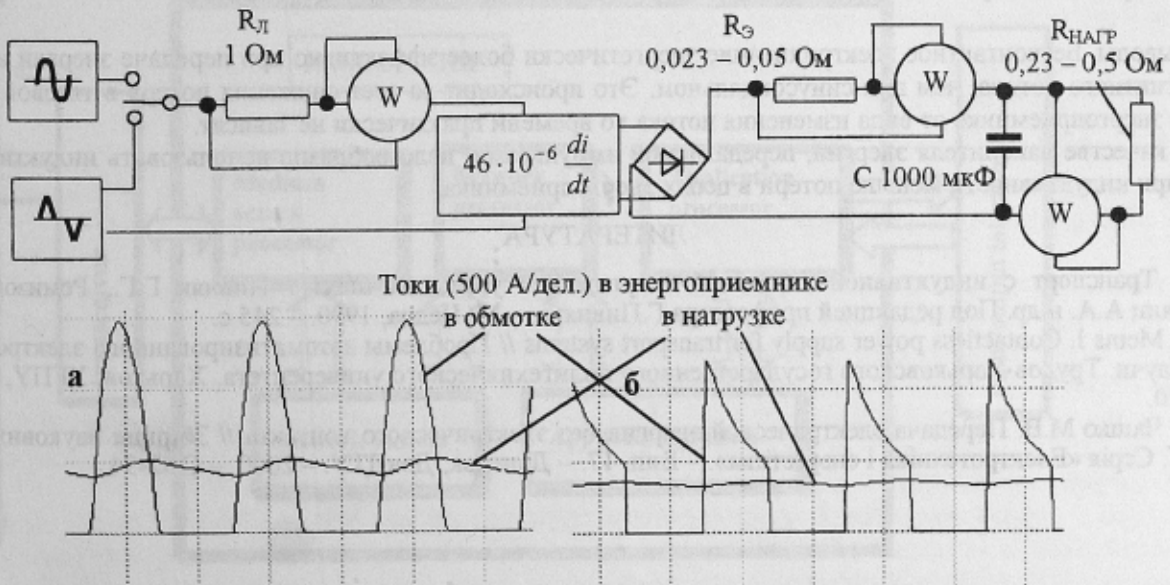


Рисунок 6 - Модель с накопителем - емкостью:  
а - при синусоидальном электропитании, б - при импульсном

нагрузке. При синусоидальном и импульсном напряжениях питания конденсатор подзаряжается в промежутках времени, когда ЭДС энергоприемника превосходит напряжение на нем. Ток заряда ограничен только сопротивлением обмотки энергоприемника и достигает большого значения и при синусоидальном и при импульсном питании, этим обусловлены повышенные потери мощности в энергоприемнике по сравнению с другими накопителями. Потери в линии такие же, как в предыдущих случаях: линия работает в режиме источника тока и потери мощности в ней обусловлены только значением тока и длительностью его протекания, а они заданы источниками энергии.

Результаты эксперимента представлены в таблице. Они качественно подтверждают адекватность процессов передачи энергии: при синусоидальном токе в линии ЭДС энергоприемника синусоидальна, при импульсном прямоугольна. Ток энергоприемника зависит от вида накопителя энергии

Таблица 1- Результаты компьютерного моделирования индукционного электропитания при мощности нагрузки 50 кВт и максимальном значении тока линии 100 А

№ п.п.	Ток в линии	Тип накопителя	Потери мощности				КПД $(1 + p)^{-1}$
			в линии, $p_{л}$ , кВт	в энергоприемнике, $p_{п}$ , кВт	Суммарные, $p_{\Sigma}$ , кВт	Относительные, $p = p_{\Sigma} / P_{п}$	
1	Синусоидальный	Емкость	5	14	19	0,38	0,72
2	Импульсный		1,5	14	15,5	0,31	0,76
3	Синусоидальный	Индуктивность	5	5	10	0,2	0,83
4	Импульсный		1,5	2,5	4,1	0,08	0,92
5	Синусоидальный	Колебательный контур	5	5	10	0,2	0,83
6	Импульсный		1,5	5	6,5	0,13	0,88
7	Синусоидальный	Без накопителя	5	5	10	0,2	0,83
8	Импульсный		1,5	5	6,5	0,13	0,88

Из таблицы видно, что потери в линии меньше при импульсном токе, потери в сопротивлении энергоприемника одинаковы для импульсного и синусоидального токов (за исключением накопителя - индуктивности), они существенно больше при накопителе - емкости из-за существенного превышения током заряда конденсатора тока через индуктивность. Во всех случаях относительные потери больше, а КПД меньше на 5 – 10% при синусоидальном токе. Это происходит за счет уменьшения потерь в линии при импульсном токе, обусловленном сокращением времени его протекания по сравнению с синусоидальным током.

Выводы. Бесконтактное электропитание энергетически более эффективно при передаче энергии импульсами магнитного потока, чем при синусоидальном. Это происходит за счет снижения потерь в тяговой линии, потери в энергоприемнике от вида изменения потока во времени практически не зависят.

В качестве накопителя энергии, передаваемой импульсами, целесообразно использовать индуктивность, так как при индуктивности меньше потери в цепях энергоприемника.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Транспорт с индуктивной передачей энергии для угольных шахт / Пивняк Г.Г., Ремизов И.П., Саратикянц А.А. и др. Под редакцией профессора Г.Пивняка. – М: Недра, 1990. – 245 с.
2. Meins J. Contactless power supply for transport systems // Проблемы автоматизированного электропривода. Сб. научн. Трудов Харьковского государственного политехнического университета. Харьков, ХГПУ, 1998. – С.216-220.
3. Чашко М.В. Передача электрической энергии без электрического контакта // Збірник наукових праць ДонДТУ. Серія «Електротехніка і енергетика». – Вип. 17. – Донецьк, ДонДТУ. – 2000. – С.92-94.