

3. Тумасов А.В. Исследование свойств активной безопасности транспортных средств методом имитационного моделирования. / А.В. Тумасов, А.М. Грошев, В.Г. Дыгало и др. // Журнал ААИ. 2011, № 2, с. 34-37.
4. Никольский В.А. Применение программно-аппаратных комплексов для оценки тормозных свойств транспортных средств по результатам имитационного моделирования. / В.А. Никольский, А.В. Тумасов, А.М. Грошев, В.В. Михайлов // Труды НГТУ. 2011, № 3(88), с. 114–118.

Анализ конструкции автомобильного генератора возвратно-поступательного движения

Духанин В.И., к.т.н. доц. Кецарис А.А.
Университет машиностроения, МЗСА

8 (495) 223-05-23, don. 1312, ketsaris@mail.ru, 8 (499) 168-87-29, vidwork@mail.ru

Аннотация. В настоящей статье рассматривается автомобильный генератор возвратно-поступательного движения со свободным поршнем, являющийся интегральным устройством, преобразующим механическую энергию возвратно-поступательного движения поршня двигателя внутреннего сгорания (ДВС) в электрическую энергию для использования в качестве бортового источника питания гибридных транспортных средств. Рассматриваются преимущества этого способа преобразования тепловой энергии в электрическую энергию и проблемы проектирования. Сформулированы требования к линейному электрогенератору со свободным поршнем. Дан краткий обзор разработок линейных электрогенераторов.

Ключевые слова: линейный электрический генератор, двигатель со свободным поршнем, линейная синхронная электрическая машина с постоянными магнитами

Введение

Генератор возвратно-поступательного движения, или линейный электрогенератор со свободным поршнем (ЛГСП), является относительно новым видом устройств, вырабатывающих электроэнергию и представляет интерес как перспективная концепция энергоустановки для гибридного транспорта, а также для передвижных и стационарных электрических энергоустановок. Появление ЛГСП объясняется поиском оптимального промежуточного звена между классическими ДВС и «чистой» электротягой. В настоящее время эту нишу интенсивно заполняет гибридный электротранспорт. Использование в гибридных схемах мало-размерного ДВС, механической трансмиссии, отдельного генератора, несмотря на выбор наиболее выгодных параметров системы, является громоздким, дорогим и трудно оптимизируемым решением преобразования тепловой энергии сгорания топлива в электрическую энергию. Вместо этого предлагается использование на борту транспортного средства интегрированной силовой установки, состоящей из двигателя внутреннего сгорания со свободным поршнем и линейного электрического генератора.

Рассматривать ЛГСП в качестве реального альтернативного решения для бортовых источников энергии транспортных средств стало возможным благодаря ряду важных технических событий, произошедших за последние 15-20 лет, среди которых можно назвать:

- развитие силовой электроники на основе мощных IGBT транзисторов;
- разработка углубленных методов управления электрическими машинами на основе сложных математических моделей (векторное управление);
- появление схемотехнической, элементной и программной базы для управления и оптимизации быстропротекающих процессов в режиме реального времени, характерных для двигателей внутреннего сгорания;
- проведение газодинамических исследований в области оптимизации сгорания топлива в ДВС (режим сгорания гомогенной топливной смеси с зажиганием от сжатия, HCCI-

Homogeneous charge compression ignition).

С другой стороны, в сфере транспортной энергетической политики усилилась устойчивая тенденция к ужесточению экологических требований к энергетическим устройствам. Все это заставляет по-новому взглянуть на ЛГСП как на перспективную энергетическую установку 21 века.

Линейный генератор со свободным поршнем является интегрированной конструкцией двух- или четырехтактного двигателя внутреннего сгорания с линейным электрическим генератором. Схематический вид ЛГСП показан на рисунке 1.

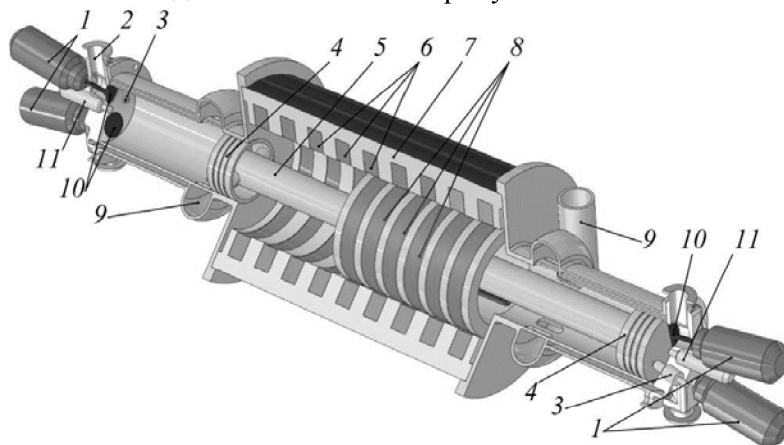


Рисунок 1 – Линейный генератор со свободным поршнем:

- 1 – электропривод клапана; 2 – выпускное отверстие; 3 – свеча зажигания;
4 – поршень; 5 – шток; 6 - катушки статора; 7 - магнитопровод статора;
8 - постоянные магниты; 9 – впускной патрубок; 10 – клапан; 11 – инжектор**

Двухцилиндровый двигатель оппозитной схемы имеет поршневую группу, состоящую из двух поршней, соединенных жестким штоком. Циклически повторяющееся давление газов в процессе сгорания топлива сообщает поршневой группе возвратно-поступательное движение. В плоскости симметрии штока между поршнями на штоке закреплена подвижная магнитная система. Подвижная магнитная система размещается внутри конструкции статора с системой обмоток. При возвратно-поступательном движении штока с закрепленным на нем магнитной системой внутри статора и взаимодействия их магнитных полей происходит возникновение электродвижущей силы в обмотках статора. В сущности это и есть принцип действия генератора со свободным поршнем, производящим электроэнергию непосредственно из линейного движения поршня без промежуточных механических звеньев. Кроме того, электрическая машина, работая в режиме двигателя, обеспечивает старт двигателя внутреннего сгорания. Электронная система управления должна осуществлять контроль движения поршней для обеспечения оптимального термодинамического цикла, а также позиционирование поршней, предотвращая их соударение с головками цилиндров.

Преимущества этого принципа преобразования энергии:

- уменьшение числа движущихся деталей за счет исключения коленчато-шатунного механизма до одного поршневого узла;
- повышение жесткости и механической надежности конструкции двигателя;
- повышение ресурса и механического КПД двигателя вследствие отсутствия шатунов, что приводит к исключению действия боковых сил, действующих на зеркало цилиндра, и уменьшению трения в цилиндропоршневой группе;
- исключение стартера для запуска ДВС, так как электрический генератор может работать и как линейный электродвигатель;
- возможность динамического изменения степени сжатия в каждом такте не механическими способами, а установкой параметров электронной системы управления;
- возможность работы с различными видами топлива (бензин, природный газ, водород, биогаз, биотопливо) посредством электронной настройки системы управления;

- реализация оптимальных режимов сгорания топлива, в том числе и гомогенного воспламенения бедных смесей (режим сгорания HCCI – Homogeneous Charge Compression Ignition) – потенциал для снижения вредных выбросов;
- снижение расходов на производство.

Обзор разработок и прототипов

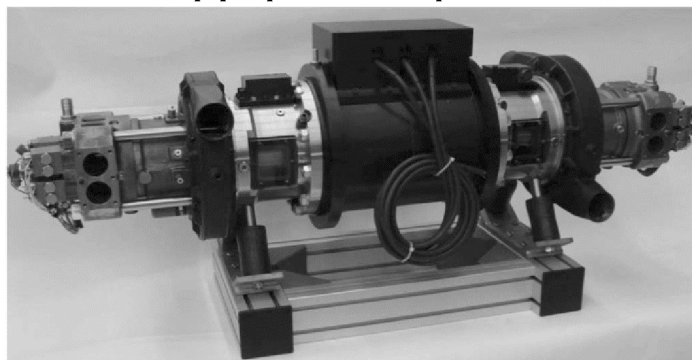


Рисунок 2 – Прототип генератора FPEC [1]

В группе исследований, закончившихся созданием опытных работающих устройств и прототипов серийных образцов, прежде всего следует выделить европейский проект [1] для исследования электрического генератора со свободным поршнем FPEC (Free Piston Energy Converter) (рисунок 2). На этот проект Европейским Сообществом в 2002 г. был выделен грант стоимостью 3,8 млн. евро на три года, в котором приняли участие ведущие европейские компании и исследовательские институты:

- | | |
|----------------------------------------|-------------------|
| ○ AB Volvo Corporation | – Швеция; |
| ○ Noax V.V. | – Нидерланды; |
| ○ Институт топлива Франции | – Франция; |
| ○ ABB AB | – Швеция; |
| ○ Innas B.V. | – Нидерланды; |
| ○ Университет технологии Чалмерса | – Швеция; |
| ○ Королевская высшая техническая школа | – Швеция; |
| ○ Университет Шеффилда | – Великобритания. |

Задачами проекта были:

- разработка чистой и энергетически эффективной технологии для транспортных силовых установок, основанной на принципе электрического генератора с двигателем внутреннего сгорания со свободным поршнем;
- реализация режима воспламенения от сжатия бедных топливных смесей HCCI;
- реализация дизельного цикла;
- разработка испытательной установки мощностью 25 кВт для демонстрации технологии FPEC с удельной мощностью не менее 0,6 кВт/кг, удовлетворяющей требованиям к выбросам транспортных двигателей Euro V.

Разработка проекта сопровождалась достаточным количеством опубликованных научных работ [2, 3].

В США исследования в этой области проводятся рядом компаний и исследовательских организаций.

В национальной лаборатории Сандиа, Ливермор уже более десяти лет проводится программа исследований Free-Piston Engine под руководством П.В.Бларигана (P.V.Blarigan) и объявлено о создании прототипа генератора мощностью 15 кВт [4, 5].

Компанией Sunpower (США, штат Огайо, Афины) разработан ряд линейных генераторов с двигателем Стирлинга для NASA и министерства обороны. Диапазон электрических мощностей моделей генераторов 40-1000 Вт [6].

Отделением электрического оборудования университета Западной Вирджинии разработан и испытан генератор со свободным поршнем мощностью 500 Вт. Использовалось два оппозитных цилиндра с электроискровым зажиганием. Постоянные магниты были установлены

на подвижной поршневой группе, а катушки размещены в пазах сердечника статора. Была поставлена цель исследования использования процесса НССИ и повышения диапазона мощности устройства [7].

Австралийская компания Pempek Systems начала в феврале 2001 г. проект энергетического модуля на основе ДВС и в 2004 г. создала прототип модуля с ДВС искрового зажигания с оригинальной запатентованной системой газообмена. В настоящее время фирма анонсирует энергетический модуль для грузового транспортного средства с электрической мощностью 100 кВт [8], [9].

Экспериментальные энергетические установки создаются на базе университетов и научных центров. В университете Регины (США) был разработан генератор с линейным ДВС, конструкция которого имела как один, так и два цилиндра. Электрическая выходная мощность достигала 1000 Вт. Применялся коммерчески производимый линейный генератор, который также служил и мотором.

Исследовательская группа факультета электрического оборудования чешского технического университета г. Прага в составе П. Немечек, О. Высоки и др. исследовала систему управления двухтактным двигателем со свободным поршнем на реальной действующей лабораторной установке. Была разработана схема управления системой двигатель-генератор, исследованы законы управления, получены экспериментальные результаты [10].

В Аэрокосмическом центре Германии, в Институте концепций транспорта, группа под руководством Ф.Риндеркнехта создала экспериментальную установку с одноцилиндровым двигателем и пневматической отбойной камерой в качестве энергоаккумулятора энергии поршня.

Экспериментальные работы проводятся в Малайзии, Южной Корее, Китае.

Следует заметить, в научно-методическом отношении исследования в этой области стали мощным стимулом появления целого направления научных и теоретических работ по теории линейных электрических машин, методов их расчета, систем управления.

Технические требования к линейной электрической машине.

Как и для проектирования любого технического устройства, для нахождения оптимального конструктивного решения необходимо задать исходные технические требования к электрической машине. Первичным источником механической энергии для электрической машины является линейный двигатель внутреннего сгорания, поэтому для определения интервалов изменений исходных кинематических и динамических параметров генератора был рассмотрен ряд серийных ДВС отечественного легкового и грузового транспорта. Принимая для упрощения анализа, что кинематические параметры движения поршня изменяются по синусоидальному закону, получаем диапазоны изменения параметров, приведенные в таблице 1.

Таблица 1

Наименование параметра	Единица измерения	Величина
Мощность на один цилиндр	кВт	11,4 – 32,5 (легковые – грузовые)
Частота колебаний поршня	Гц	34 – 94 (дизель – эл. зажигание)
Средняя сила	кН	5,18 – 12,5
Максимальная скорость	м/с	27,7 – 47 (дизель – эл. зажигание)
Максимальное ускорение	G (9,81 м/с ²)	652 – 2609

Необходимо отметить высокие значения знакопеременной инерционной нагрузки, действующей на подвижный элемент, так как он, в сущности, исполняет роль шатуна в обычном ДВС. Однако по сравнению с шатуном инерционную нагрузку на подвижный элемент можно считать строго осевой, что несколько ослабляет требования к устойчивости и прочности его конструкции. Знакопеременные нагрузки будут действовать и на все элементы магнитных

цепей, образуемых в процессе движения подвижного элемента. В связи с этим следует обратить внимание на требования к клеевому и механическому креплениям постоянных магнитов в случае их установки на подвижном элементе, а также и на распределение нагрузок в самом материале постоянных магнитов, который достаточно хрупок.

На конструкцию подвижного элемента воздействуют два типа тепловых потоков:

- 1) тепловой поток со стороны поршня от сгорания топлива в камере сгорания;
- 2) внутренние распределенные тепловые потоки от вихревых токов.

Для уменьшения воздействия тепловых потоков первой группы необходимо предусмотреть конструктивные решения: теплоизоляция между корпусом поршня и подвижным элементом, уменьшение эффективной площади теплопередачи, применение низкотеплопроводных конструкционных материалов, а для тепловых потоков второй группы – рассеечение путей вихревых токов (шихтование), применение конструкционных материалов с низкой электропроводностью (порошковые магнитные материалы).

Колебательное движение подвижного элемента можно в некотором приближении описать, рассматривая механическую систему, состоящую из массы, газовой пружины, импульсной внешней силы (процесс сгорания), тормозящей силы (воздействие генератора). Система будет иметь собственную частоту колебаний, зависящую от массы подвижного элемента. Для повышения удельных энергетических характеристик линейного генератора необходимо стремиться к увеличению скорости движения подвижного механизма относительно магнитной системы статора, то есть – частоты колебаний подвижного элемента, а следовательно, и собственной частоты колебаний механической системы. Поэтому следует уменьшать массу подвижного элемента.

Критические факторы для эффективности линейной электрической машины:

- Собственная частота поршневой конструкции значительно ниже, чем частота вращающегося двигателя, что приводит к снижению удельной мощности по отношению к объему активного материала машины.
- Всегда имеются части статора или подвижного элемента линейной машины, которые неактивны. Это приводит к снижению удельной мощности. Для рационального использования активного материала длина статора либо транслятора должна быть равна длине рабочего хода, а другой должен больше на величину длины рабочего хода.
- Имеются разрывности магнитных полей как в статоре, так и в подвижном элементе (в виде краевых эффектов), которые понижают производительность переноса энергии от краевых зон.
- Имеются высокие требования к конструкции магнитопровода (например, требование полного замыкания магнитного потока полюсов на краевых полюсах), что снижает удельную производительность.
- Масса подвижной конструкции ограничена, что существенно ограничивает количество доступного активного материала в подвижной конструкции, величину доступной области активного воздушного зазора и может служить ограничением мощности машины при заданных габаритах.
- Зависимость скорости от времени является пульсирующей и прерывной. Это ухудшает производительность машины по сравнению со случаем постоянной скорости машины.

Для обеспечения старта двигателя внутреннего сгорания, а также при использовании четырехтактного цикла ДВС электрическая машина должна иметь возможность работы в двигательном режиме. Переключение режимов должно осуществляться динамически в процессе работы.

Типы электрических машин

Одним из главных вопросов проектирования генератора со свободным поршнем является выбор типа и конструкции электрической машины. Выбор должен производиться не только с учетом параметров производительности самой машины, но и с учетом оптимизации таких параметров энергоустановки транспортного средства в целом, как эффективность, высокая удельная мощность, конкурентоспособность с другими решениями гибридного

транспорта.

Требование отсутствия механических узлов, обслуживаемых в процессе работы, таких как механический коммутатор и щеточные узлы, исключают из рассмотрения щеточные машины постоянного тока, обладающие к тому же большей стоимостью и увеличенными габаритами по сравнению с машинами переменного тока. Следовательно, электрическая машина должна быть бесконтактной.

Линейные асинхронные машины, перспективные в качестве тяговых двигателей для транспорта на магнитной подушке, также не рассматриваются по причине невысокой удельной мощности машины в расчете на рабочий объем электрической машины.

Исходные параметры электрической машины приведены в таблице 2.

Конструктивно линейный генератор может быть выполнен в виде:

- плоской односторонней машины;
- плоской двухсторонней машины;
- цилиндрической машины;
- машины сложной геометрии.

Плоские машины вследствие поперечного краевого эффекта имеют рассеивание магнитных потоков, приводящее к снижению производительности этих машин, к тому же их форма вызывает затруднение для компоновки в моторном отсеке транспортного средства. Однако они могут быть удобны для лабораторных и экспериментальных исследований прототипов силовых установок, поскольку рядом фирм налажено их серийное производство.

В качестве прототипа была выбрана синхронная цилиндрическая электрическая машина с возбуждением от постоянных редкоземельных магнитов.

Таблица 2

Наименование параметра	Ед. изм.	Величина
Рабочий ход	мм	100
Частота	Гц	30
Мощность генератора (механическая),	кВт	50
Количество фаз машины		3
Магнитный поток в магнитопроводе, не менее	Т	1,4
Потери на трение	%	5
Плотность тока в обмотке	А/мм ²	6,5
Максимальная длина машины	мм	500
Тип магнитов		NdFeB
КПД		0,9
Коэффициент мощности,	cos(φ)	0,8
Удельная мощность, не менее	кВт/кг	1,0

Синхронная цилиндрическая машина с постоянными магнитами

В работе [11] проведен анализ устройства статорных обмоток с различной комбинацией фаз и продольных размеров постоянных магнитов. Был выбран вариант обмотки с одним пазом на полюс, парой на фазу. Исходя из аналитической модели цилиндрической машины с кольцевыми постоянными магнитами из NdFeB, была проведена оптимизация геометрических параметров магнитной системы с учетом потерь в преобразователе.

Таблица 3

Радиус магнитов	R_m	мм	46,8
Толщина магнитов	h_m	мм	5
Воздушный зазор	G	мм	1
Наружный радиус статора	R_e	мм	100
Шаг магнитов	τ_m	мм	27,6
Шаг полюсов	τ_p	мм	27,6

Показано, что для расчетной модели машины постоянной выходной мощности 44 кВт

существуют оптимальные отношения $R_m/R_e = 0,54$ и $\phi_p/R_e = 0,38$, которые приводят к максимальному КПД машины 0,942. Однако фактор мощности при этих значениях 0,73, что потребовало рассмотрения оптимизации с учетом потерь в преобразователе. При учете этого оптимум происходил при параметрах $R_m/R_e = 0,64$ и $\phi_p/R_e = 0,26$, при котором КПД системы привода 0,9.

Цилиндрическая трехфазная машина с постоянными магнитами, имеющая 9 пазов и 10 полюсов, оборудована модульными статорными обмотками, которые расположены рядом друг с другом, как показано на рисунке 3. Особенностью конструкции является подвижная магнитная система, использующая намагниченные магниты в виде квази-Halbach-структуры. Каждый полюс составлен из комбинации двух кольцевых магнитов, один из которых имеет радиальную намагниченность, а другой – аксиальную намагниченность. При этом получается синусоидально распределенный магнитный поток в воздушном зазоре. Особенность квази-Halbach намагниченности состоит в том, что осевые намагниченные магниты предоставляют обратный путь для потока в воздушном зазоре, и, следовательно, поток во внутренней полости арматуры относительно мал. Таким образом, постоянные магниты могут устанавливаться на немагнитной несущей трубе с высокой прочностью без большого снижения осевой несущей способности, вследствие чего значительно снижается масса подвижной конструкции, которая существенна для достижения высокой выходной мощности линейного генератора.

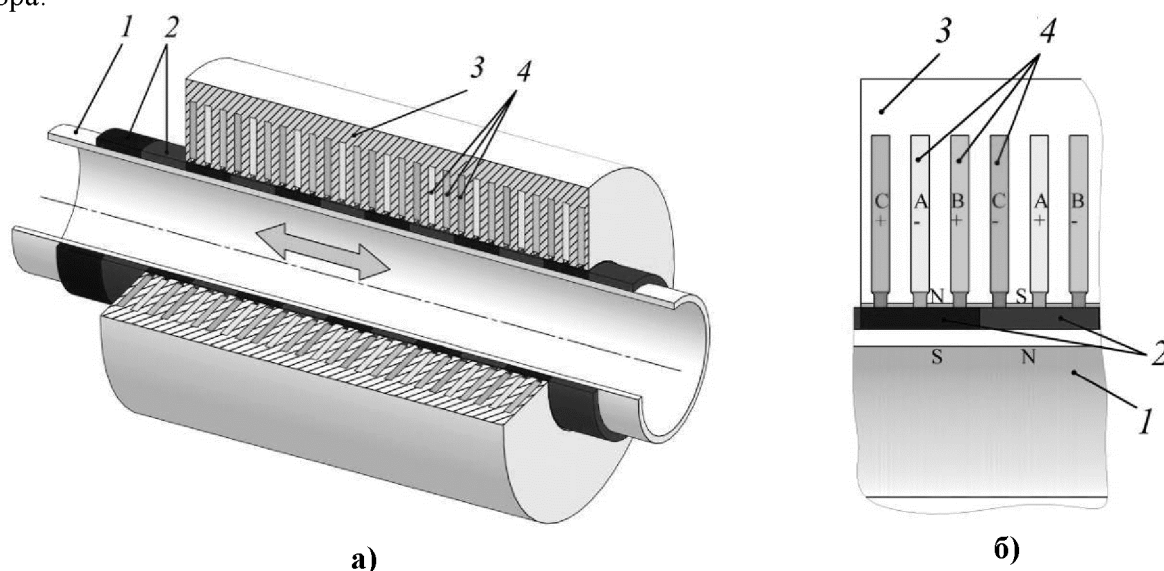


Рисунок 3 – Схема линейной электрической машины: а) общий вид машины: 1 – несущая труба (титан); 2 – кольцевые постоянные магниты; 3 – ярмо статора; 4 – фазные обмотки; б) схема чередования фаз [11]

Как и в конструкции машины, рассматриваемой выше, исследовалось влияние конструктивных параметров R_m/R_e и τ_p/R_e на производительность машины и системы в целом, включая преобразователь. Показано, что при фиксированной при расчетах мощности 44 кВт КПД системы составляет 0,9.

Заключение

Как было показано в кратком обзоре, задача создания силовой установки в составе линейного генератора и двигателя внутреннего сгорания со свободным поршнем представляет собой сложную техническую задачу, решение которой лежит на стыке физики процесса сгорания топлива, теории систем управления быстропротекающими процессами в реальном времени, быстродействующей силовой электроники и техники линейных электроприводов. Все эти технологии можно считать на сегодняшний день достаточно глубоко разработанными и вопрос в разумном синтезе систем.

Синхронная электрическая машина с возбуждением от постоянных магнитов в качестве

линейного генератора может рассматриваться как перспективная электрическая машина.

Литература

1. Land transport and marine technologies. "RTD activities supported under the Growth Programme (p.20, FPEC)", 2002.
2. Arshad W.M., Sadarangani C., Bäckström T., Thelin P. Finding an Appropriate Electrical Machine for a Free Piston Generator. Department of Electrical Engineering KTH, the Royal Institute of Technology, Stockholm, SWEDEN, 2002.
3. Liu Y., Leksell M., Arshad W.M., Thelin P. Influence of Speed and Current Profiles upon Converter Dimensioning and Electrical Machine Performance in a Free-Piston Generator. Department of Electrical Engineering KTH, the Royal Institute of Technology, Stockholm, SWEDEN, 2003.
4. Blarigan P.V. Advanced internal combustion electrical generator. Proceedings of the 2001 DOE Hydrogen Program Review, 2001.
5. Blarigan P.V. Project Free-Piston Engine. 2011 DOE Vehicle Technologies Program Annual Merit Review, 2011.
6. www.sunpower.com
7. Atkinson C.M. and all Numerical Simulation of a Two-Stroke Linear Engine-Alternator Combination. SAE TECHNICAL PAPER SERIES, March, 1999.
8. Carter D., Wechner E. The Free Piston Power Pack: Sustainable Power for Hybrid The Free Piston Power Pack: Sustainable Power for Hybrid. Pempek Systems Pty. Ltd., Australia, 2003.
9. www.freepistonpower.com
10. Němeček O.V.P. Control of two-stroke free-piston generator. Faculty of Electrical Engineering, Czech Technical University Prague, Czech Republic, 2007.
11. Wang J., Howe D. Design Optimization of Radially Magnetized, Iron-Cored, Tubular Permanent-Magnet Iron-Cored, Tubular Permanent-Magnet. IEEE Transactions on magnetic, Vol.40, No.5, September 2004

Анализ рабочего процесса линейного генератора с возвратно-поступательным движением

Духанин В.И., к.т.н. доц. Кецарис А.А.

Университет машиностроения, МЗСА

8 (495) 223-05-23, доп. 1312, ketsaris@mail.ru, 8 (499) 168-87-29, vidwork@mail.ru

Аннотация. В настоящей статье рассматривается интегральная силовая установка, состоящая из двигателя внутреннего сгорания со свободным поршнем и линейной электрической индукторной машины с возбуждением от постоянных магнитов на статоре. Исследуется генераторный режим работы линейной электрической индукторной машины. Сравняются две системы расположения постоянных магнитов. Приводятся данные расчетов рабочих характеристик линейной электрической машины.

Ключевые слова: линейный электрический генератор, линейная синхронная электрическая машина с постоянными магнитами.

Введение

Интегральная силовая установка, состоящая из двигателя внутреннего сгорания со свободным поршнем и линейной электрической машины, рассматривается в настоящее время в качестве альтернативного бортового источника энергии для гибридных транспортных средств, а также как мобильный источник электроэнергии. Особенностью этого устройства является отсутствие жесткой механической связи в виде коленчатого вала, определяющей конструктивно заданную степень сжатия и параметры протекания термодинамического процесса сгорания топлива. Эти параметры определяются динамическим равновесием сил давления, действующих на поршни, сил трения, силы инерции и электродинамических сил, возникающих в линейной электрической машине вследствие индуцирования электрических то-