

Применение линейного электрического генератора с двигателем со свободным поршнем в гибридных автомобилях

Авторы:

доцент МАМИ каф.ЭКЭМС, к.т.н. Кецарис А.А.
аспирант МАМИ каф.ЭКЭМС Духанин В.И.

Аннотация: В настоящей работе рассматривается применение линейной синхронной электрической машины, интегрированной с двигателем внутреннего сгорания со свободным поршнем, в качестве генератора в силовых установках гибридных транспортных средств. Рассматриваются виды конструкций, схемы и преимущества применения интегрированного линейного генератора.

Введение

Интенсивное развитие автомобилестроения привело к экологическим проблемам, связанным с выбросами токсичных веществ, содержащихся в отработанных газах двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Ведущие автомобилестроительные фирмы мира вкладывают огромные средства в разработки по уменьшению токсичности отработанных газов и снижению расхода топлива ДВС. В настоящее время, несомненно, одним из направлений в работе создания автомобилей с предельно низкой токсичностью и высокой экономичностью является применение бортовых гибридных силовых установок, состоящих из ДВС, тягового электропривода и различных типов источников, накопителей энергии.

В настоящее время разработаны ставшие уже классическими различные схемы гибридного привода: последовательная, параллельная, последовательно-параллельная и др. В этих схемах в том или ином соединении присутствуют ДВС и генератор электрического тока, представляющие собой сложные механические устройства с множеством элементов преобразования механической энергии.

Многообещающей альтернативой первичной силовой установки, не использующей вращательное движение, является линейный электрический генератор с двигателем со свободным поршнем (ЛГСП). ЛГСП является комбинацией ДВС со свободным поршнем и линейной электрической машины. Подвижная часть в этом двигателе, включающая поршень (поршни) и подвижный элемент электрической машины, осуществляет возвратно-поступательное движение, определяемое силами, действующими на поршень и подвижный элемент электрической машины, а не механической связью через шатун с коленчатым валом. Это приводит к исключению элементов шатунно-коленчатого механизма из конструкции, что снижает сложность, стоимость изготовления, расходы на обслуживание, кроме того исключается действие боковой силы на цилиндрпоршневую пару, что снижает трение и, уменьшая износ поверхностей цилиндра и поршня, увеличивает ресурс двигателя.

1. Обзор разработок и исследований

Интерес к разработке и исследованию линейных генераторов с двигателями со свободным поршнем не ослабевает уже более тридцати лет и эта тема привлекает все больше и больше исследователей. Сначала теоретические исследования были сосредоточены на изучении линейной электрической машины, среди которых следует

отметить работы Болдея и Назар [1,2], представивших анализ линейного генератора с постоянными магнитами. С широким распространением компьютерных методов моделирования, в том числе методом конечных элементов, появились работы по оптимизации конструкции линейной электрической машины, как отдельного устройства, так и в совместном анализе с двигателем.

В ранних публикациях рассматривались комбинации линейного генератора и двигателя Стирлинга, однако затем центр внимания исследователей переместился на использование двигателя внутреннего сгорания.

В то время как многие опубликованные работы, которые касаются комбинаций линейного двигателя и электрического преобразователя, рассматривают в центре внимания либо преобразователь либо двигатель, в последние годы опубликовано несколько работ, которые рассматривают систему более целостно.

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 [3]. Генератор со свободным поршнем был применен вместе с двигателем Стирлинга в космическом полете и труднодоступных областях применения. Однако двигатели внешнего сгорания достаточно тяжелы (по сравнению с двигателями внутреннего сгорания) и не подходят для использования в транспортной технике.

Известные работы по использованию генераторов со свободным поршнем в комбинации с двигателем внутреннего сгорания кратко приведены ниже.

- В национальной лаборатории Сандиа, США, Ливермор (Sandia National Laboratories, Livermore) создан прототип генератора мощностью 15 кВт [4].

- Отделением электрического оборудования университета Западной Вирджинии разработан генератор со свободным поршнем мощностью 500 Вт. Он был испытан и использовал два оппозитных цилиндра с электроискровым зажиганием. Постоянные магниты монтируются на подвижном поршне, а катушки размещены в пазах сердечника статора. Была поставлена цель в исследовании использования процесса компрессионного зажигания и повышения диапазона мощности устройства.

- В центре электромеханики университета Техаса г.Остин (США) были разработаны схема, конструкция и проведены испытания генератора со свободным поршнем, использующим преобразователь индукторного типа. В конструкции индукторного генератора продолжение юбки поршня использовалось в качестве каркаса для крепления постоянных магнитов, вместо обычно применяемого отдельного индуктора с постоянными магнитами. Это придало устройству жесткость и компактность. Однако устройство имело низкую удельную мощность, хотя и компенсируемую достаточным набором отдельных модулей.

Первичная цель этой разработки – применение в военной области и других критических областях транспорта.

- Исследовательской корпорацией Галилео (Galileo Research Inc.) был разработан коммерческий блок, который имеет один подвижный компонент: сборный шток поршня, интегрированный с двигателем внутреннего сгорания. В конструкции использовался подвижный элемент с постоянными магнитами. Работа компании прекращена по юридическим причинам.

- В университете Регины (США) было также разработано подобное устройство, конструкция которого имела как один, так и с 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.

- Австралийская компания Pempex 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 с электрической мощностью 100 кВт.

- Европейским сообществом в 2002 г. был выделен гранд стоимостью 3,7 млн. евро на три года для исследования преобразователя энергии со свободным поршнем, в котором приняли участие европейские компании и исследовательские институты(рис.1)[5]:

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

Задачи проекта:

- разработать чистую и энергетически эффективную технологию для транспортных силовых установок, основанную на принципе свободного поршня;

- включить в состав систему сжигания топлива HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition);

- запустить установку на дизельном топливе, и энергетический компактный линейный электрический генератор, преобразующий механическую энергию поршня непосредственно в электрическую энергию;

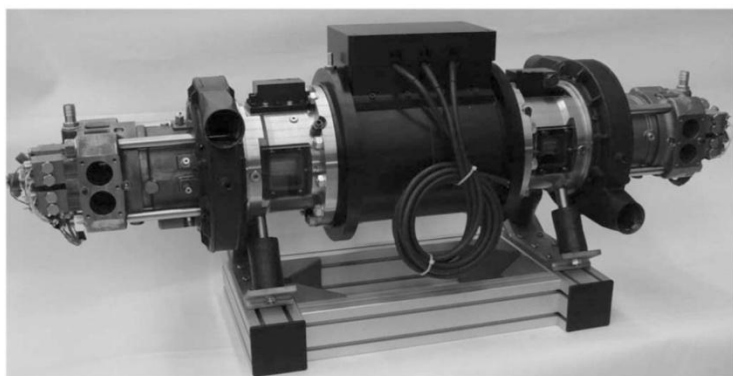


Рис.1 Генератор, разработанный в Европейском проекте[3].

- разработать испытательную установку мощностью 25 кВт, для демонстрации технологии FPEC (Free Piston Energy Converter), с удельной мощностью не менее 0,6 кВт/кг, удовлетворяющей требованиям на выбросы транспортных двигателей Euro V. Проект закончился разработкой работающей силовой установки мощностью 40 кВт.

2. Применение линейного электрического генератора в гибридных автомобилях

Существует большое количество компоновочных схем линейного генератора с двигателем внутреннего сгорания со свободным поршнем [4]. Их можно разделить на две группы по признаку наличия или отсутствия отбойного устройства, аккумулирующего кинетическую энергию подвижного элемента на каждом такте. Чаще всего отбойное устройство, выполняющее роль пневматической пружины, представляет собой пневматическую камеру, заполненную сжатым газом. Схемы ЛГСП приведены на рис.2. Достоинство схем с отбойными устройствами - возможность динамического изменения

параметров процесса сгорания (степени сжатия, величины рабочего хода) за счет изменения параметров отбойного устройства (давления и количества сжатого газа).

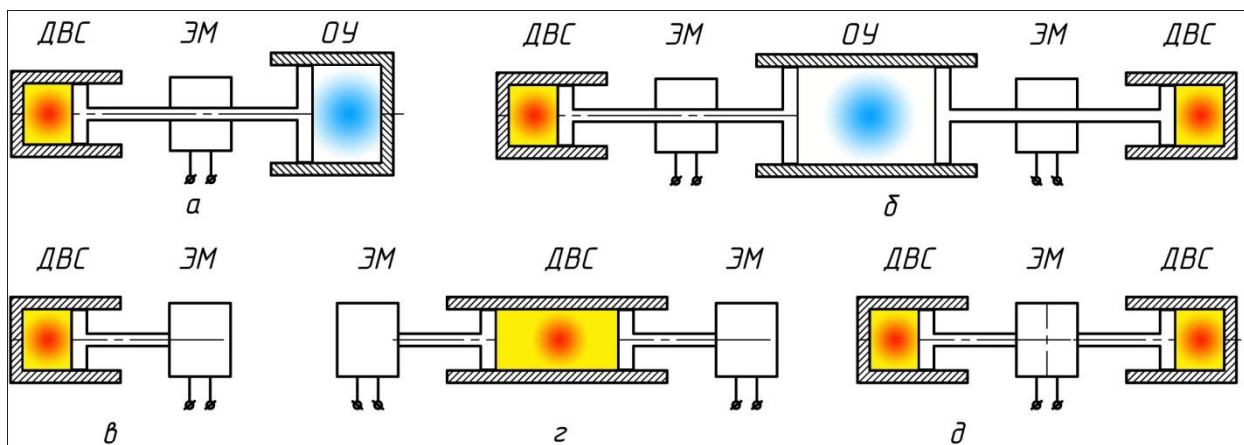


Рис.2 Схемы ЛГСП с пневматической отбойной камерой. Обозначения: ДВС – двигатель внутреннего сгорания; ЭМ – электрическая машина; ОУ – отбойное устройство.

а – схема с одноцилиндровым двигателем и отбойным устройством;
 б – схема с двухцилиндровым двигателем и общим отбойным устройством;
 в, г, д – схемы без отбойного устройства.

Функцию отбойного устройства может выполнять и сама электрическая машина, которая при обратном ходе поршня будет работать в режиме двигателя (рис.2, в, г). При этом система должна иметь устройство накопления электрической энергии с возможностью заряда в течение полутакта и последующего разряда, например, блок суперконденсаторов.

Схема на рис.2,д позволяет обойтись без отбойных устройств. Теоретически эта схема исследовалась рядом научных групп, были также построены работающие двигатели, например, вышеупомянутый европейский проект FPES (Free Piston Energy Converter). В качестве ДВС использовался двухтактный двигатель с искровым зажиганием с прямым впрыском топлива.

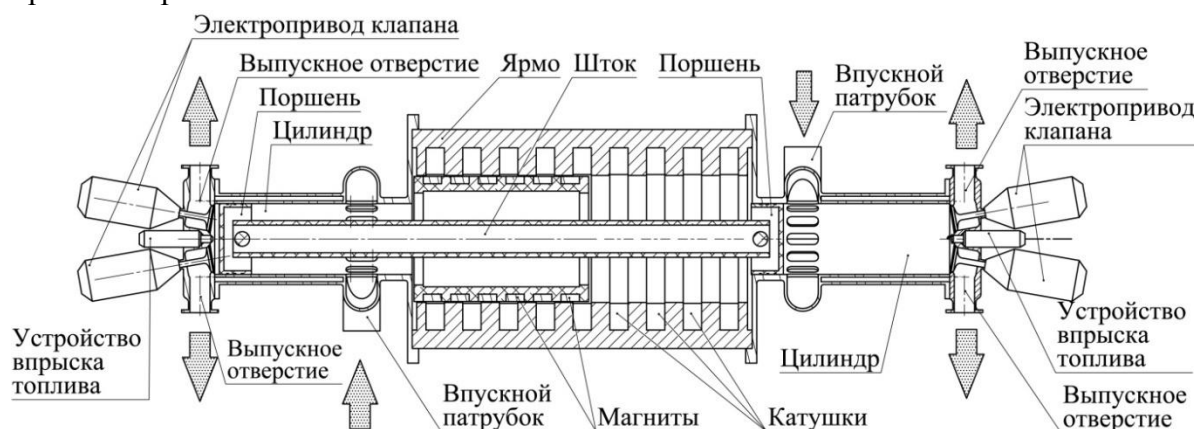


Рис.3 Линейный генератор с ДВС с оппозитными цилиндрами.

Схематический разрез двухтактного двигателя с прямоточной продувкой с оппозитным расположением цилиндров и электрической машиной между ними показан на рис.3. Двигатель внутреннего сгорания представляет два цилиндра, установленных на торцевых фланцах электрической машины напротив друг друга, в которых движутся поршни, связанные общим штоком. На средней части штока жестко закреплена подвижная магнитная система электрической машины, состоящая из кольцевых постоянных магнитов с проставками между ними. На наружных частях цилиндров

установлены головки цилиндров с клапанными механизмами на каждой из них, на частях цилиндров, ближайших к электрической машине выполнены продувочные окна. Клапанный механизм приводится в движение электромагнитными приводами клапанов. Впрыск топлива осуществляется инжекторной топливной форсункой с электромагнитным приводом.

Электрическая машина представляет синхронную линейную машину с возбуждением от высокоэнергетических постоянных магнитов. В рассматриваемом варианте кольцевые постоянные магниты жестко закреплены на штоке и движутся внутри магнитной системы статора электрической машины. Статор состоит из внешнего магнитопровода – ярма, во внутренних кольцевых проточках которого уложены фазные катушки, соединенные последовательно соответственно фазам. Электрическая машина в данном варианте выполнена как трехфазная электрическая машина. Следует отметить, что для работоспособности системы электрическая машина должна иметь возможность работать в двух режимах: генераторном (основной) и двигательном (запуск).

Электрическая машина должна иметь систему управления, выполняющую следующие функции:

- в генераторном режиме в процессе преобразования поступательной механической энергии в электрическую энергию регулировать баланс распределения отводимой энергии и энергии требуемой для последующего цикла сжатия ДВС;
- обеспечивать заданное движение поршня для предотвращения столкновения поршня с головкой цилиндра и требуемую степень сжатия;
- переключение силовых электронных элементов при работе электрической машины в режиме двигателя для запуска двигателя, а также продолжение движения поршней в случае пропуска зажигания.

Во время работы поршни ускоряются за счет давления газов сгорания топливной смеси и движутся от одной стороны к противоположной. Получаемая энергия частично используется на сжатие топливной смеси в противоположном цилиндре. Эти действия периодически повторяются. Разность между энергией, получаемой за счет сгорания смеси, и энергией, затрачиваемой на сжатие смеси и механическими потерями, отводится из системы, как электрическая энергия посредством линейного электрической машины, работающей в генераторном режиме. Выходная энергия получается непосредственно в электрической форме.

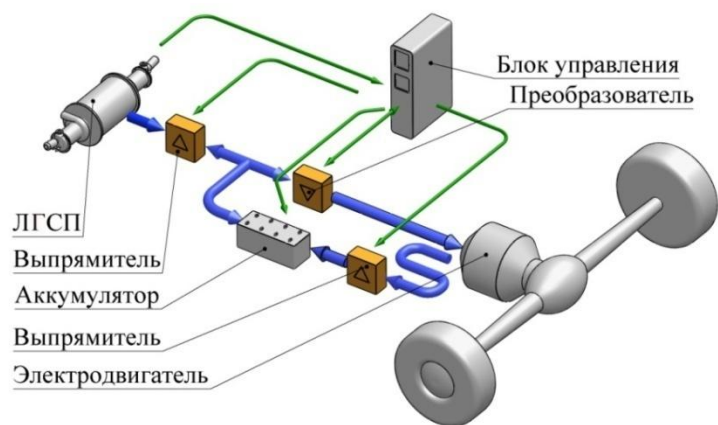
Использование линейного генератора в гибридных автомобилях заключается в замене традиционного ДВС и электрического вращающегося генератора на интегрированный модуль ЛГСП.

Преимущества использования ЛГСП:

- модульное исполнение ЛГСП позволяет изменять мощность силовой установки путем изменения количества модулей в зависимости от задачи, выполняемой транспортным средством, без существенного изменения компоновки транспортного средства в целом;
- высокая ремонтпригодность в сочетании с потенциально значительно увеличенным ресурсом вследствие возможности замены неисправных модулей (военные и специальные применения) в том числе и в полевых условиях;
- вследствие отсутствия кинематической связи ведущих колес с силовым приводом размещение модулей ЛГСП менее зависит от компоновки транспортного средства и может быть, например, рассредоточенной или навесной;
- динамическое изменение режимов сгорания топлива и регулирования мощности путем изменения параметров электронной системы управления;
- изменение мощности в каждом такте;

- возможность автоматической оптимальной адаптации к типу топлива по мощностному критерию или критерию экономичности. Реализация режима обедненного сгорания (режим HCCI).

Тяговые системы гибридных автомобилей могут иметь различные варианты схем: последовательные, параллельные, последовательно-параллельные и др. Рассмотрим последовательную схему, в которой отсутствуют кинематическая связь ДВС с ведущими колесами, а также такой сложный механический узел, как коробка переключения передач, что упрощает конструкцию. Кроме того, в последовательной схеме легко организовать



работе ДВС, оптимальные по удельному расходу топлива и токсичности отработанных газов, путем стабилизации его мощности и частоты вращения коленчатого вала.

Заменяя традиционный ДВС и вращающийся генератор на интегрированный блок линейного генератора и ДВС со свободным поршнем, получаем последовательную схему с ЛГСП (рис.4)

Рис.4 Последовательная гибридная схема с использованием ЛГСП.

3. Заключение

В настоящей работе рассмотрено применение линейных генератора с двигателем внутреннего сгорания со свободным поршнем как интегрированной силовой установки в гибридных автомобилях.

Дан краткий обзор теоретических исследований и существующих разработок линейных генераторов с двигателем со свободным поршнем (ЛГСП). Рассматриваются виды электрических линейных машин и требования к ним для применения в ЛГСП.

Список литературы

1. Boldea, I. Synchronous generators. The Electric Generators Handbook. Taylor & Francis Group, 2006
2. Boldea, I. Variable speed generators. The Electric Generators Handbook. Taylor & Francis Group, 2006
3. High Performance Free-Piston Stirling Engines, Sunpower Inc. Athens, Ohio USA.2005
4. Cawthorne William R., Optimization of a Brushless Permanent Magnet Linear Alternator for Use With a Linear Internal Combustion Engine. Dissertation, the College of Engineering and Mineral Resources at West Virginia University, Morgantown, West Virginia, 1999
5. Hanson Jorgen, Analysis and Control of a Hybrid Vehicle Powered by a Free-Piston Energy Converter, Electrical Machines and Power Electronics School of Electrical Engineering. Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden 2006