

# Линейный генератор с двигателем внутреннего сгорания со свободным поршнем.

## Структура и перспективы применения

Авторы:

доцент МАМИ, к.т.н.

ведущий конструктор МЗСА

аспирант МАМИ

Кецарис А.А.

Духанин В.И.

**Аннотация:** В настоящей статье рассматривается интегральная силовая установка, состоящая из двигателя внутреннего сгорания со свободным поршнем и линейной электрической машины. Приводится обзор разработок и прототипов, виды компоновочных схем линейного генератора с двигателем со свободным поршнем. Анализируется динамика и резонансная характеристика, система управления. Обсуждается применение альтернативных видов топлива.

**Ключевые слова:** двигатель внутреннего сгорания со свободным поршнем, линейная электрическая синхронная машина.

### **Free piston linear generator. Structure and application perspective.**

**Abstract:** In this paper an integral power plant consisting of an internal combustion engine with free piston and linear electric machine is described. An application and prototype survey, free piston generator configuration sorts is showed. The dynamic and the resonance response, a control system is analyzed. Alternative fuel application is discussed.

**Index Terms:** linear machine, permanent-magnet machine, free piston linear generator

## Введение

В настоящее время, когда все очевиднее видна ограниченность запасов углеводородного ископаемого топлива, человечество интенсивно ищет новые типы силовых установок, как для транспортных средств, так и для стационарных энергетических устройств. Безусловно, в перспективе преобладающей станет электрическая тяга, однако сейчас внедряются переходные решения – гибридные транспортные средства, электромобили с батареями на топливных элементах, транспортные средства на сжатом газе и т.п.

По удельной энергоёмкости углеводородное топливо пока еще вне конкуренции для массового автомобилестроения. Это говорит о том, что по крайней мере ближайшие 20-30 лет двигатель внутреннего сгорания будет господствовать в автомобилестроении.

Однако сам ДВС интенсивно эволюционирует, превращаясь из чисто механического устройства в электромеханический комплекс с электронным управлением.

В настоящей статье рассматривается малоизвестный в отечественной технической литературе тип силовой установки – линейный генератор возвратно-поступательного действия с двигателем внутреннего сгорания со свободным поршнем (ЛГСП).

Исторически двигатель внутреннего сгорания со свободным поршнем известен достаточно давно и использовался ограничено, например, в воздушных компрессорах или как генератор газов для последующей работы в турбоустановке. Однако, начиная с 90-х годов в мире начались исследования двигателя со свободным поршнем в сочетании с гидравлическим насосом как силового агрегата автомобиля, а затем и в сочетании с линейным генератором электрического тока. Схематический вид ЛГСП показан на рис.1.

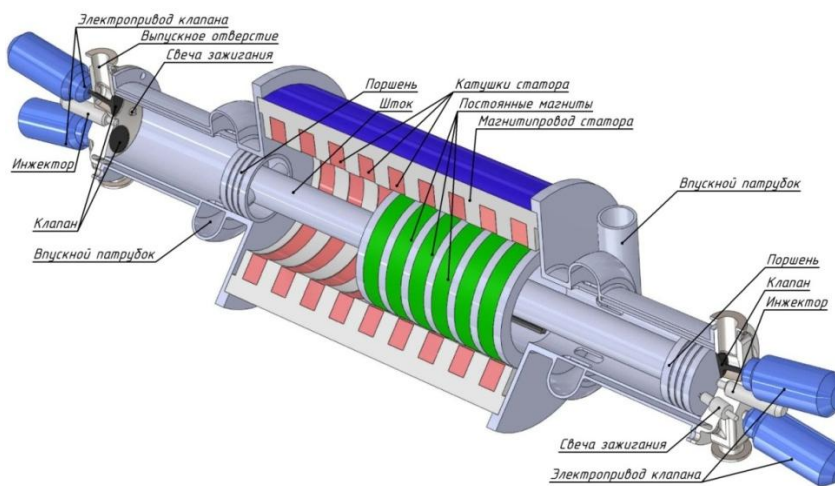


Рис.1 Линейный генератор со свободным поршнем

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 закрепленной 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 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 гомогенное воспламенение бедных смесей (режим сгорания НССИ). Потенциал для снижения вредных выбросов.
- снижение расходов на производство.

## 1. Обзор разработок и прототипов.

Состояние исследований и разработок в области ЛГСП приведено в таблице 1.

Таблица 1

Стадия разработки	Исследовательская группа	Страна
Создание опытных работающих устройств и прототипов серийных образцов	Группа европейских исследователей, работающих в рамках гранта Европейского сообщества 2002-2006 [1]	Европейский союз
	Компания Sunpower, Inc, линейка генераторов на основе двигателя Стирлинга	США
	Университет Ньюкастла, группа под руководством Р.Микалсена и А.П.Роскилли (R.Mikalsen, A.P.Roskilly)	Великобритания

	Национальная лаборатория Сандиа, Питер Ван Блариган (P.V.Blarigan) [2]	США
	Rempek Systems Pty. Ltd, проект FP3 (прототип коммерческого изделия)	Австралия
Лабораторные установки	Технический университет Чехии, факультет электрического оборудования, П.Немечек, О.Высоки, проект LCE [3]	Чехия
	Университет Западной Вирджинии, Отделение механики и аэрокосмического оборудования, В.Кауфорн и др.	США
	Аэрокосмический центр Германии, Институт концепций транспорта, Ф.Риндеркнехт и др.	Германия
	Университет Малайзии, отделение электрического оборудования, В.Х.Ароф, Х.В.Пинг (линейный генератор с постоянными магнитами)	Малайзия
	Университет технологии PETRONAS	Малайзия
	Университет Хосео, отделение информатики и управления, С.Хонг, Х.Чой и др.	Корея
Теоретические работы по линейному генератору и ДВС	Королевский институт технологии, отделение электрического оборудования, группа исследователей (на материалах гранта Европейского сообщества)	Швеция
Теоретические работы по линейному генератору	Университет Шеффилда, отделение электроники и электрического оборудования, Д.Ванг, Д.Хоув	Великобритания
	Университет технологии Эйнховена, отделение электрического оборудования, группа электромеханики и силовой электроники, Б.Л.Дж.Гейсен, Е.А.Ломонова, Д.Д.Паулидес и др.	Нидерланды

Европейским сообществом в 2002 г. был выделен грант стоимостью 3,8 млн. евро на три года для исследования генератора энергии со свободным поршнем FPEC<sup>1</sup> (рис. 2), в котором приняли участие европейские компании и исследовательские институты:

AV 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.

Задачи проекта:

- разработать чистую и энергетически эффективную технологию для транспортных силовых установок, основанную на принципе электрического генератора с двигателем внутреннего сгорания со свободным поршнем;
- реализация режима воспламенения от сжатия бедных топливных смесей HCCI<sup>2</sup>;
- реализация дизельного цикла;
- разработать испытательную установку мощностью 25 кВт, для демонстрации технологии FPEC, с удельной мощностью не менее 0,6 кВт/кг, удовлетворяющей требованиям на выбросы транспортных двигателей Euro V.

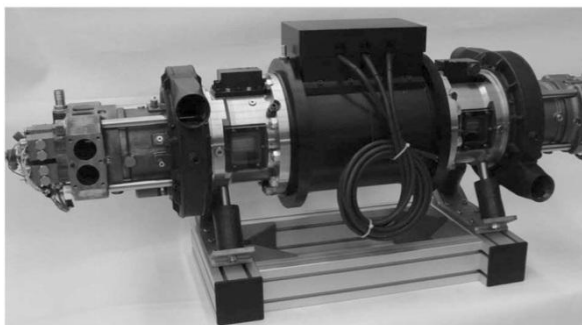


Рис.2. Прототип генератора FPEC

Разработка проекта сопровождалась достаточным количеством опубликованных научных работ [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].

В национальной лаборатории Сандиа, США, Ливермор уже более десяти лет проводится программа исследований Free-Piston Engine под руководством П.В.Бларигана и объявлено о создании прототип генератора мощностью 15 кВт [7].

<sup>1</sup> FPEC - Free Piston Energy Converter

<sup>2</sup> HCCI - Homogeneous Charge Compression Ignition

Отделением электрического оборудования университета Западной Вирджинии разработан и испытан генератор со свободным поршнем мощностью 500 Вт. Использовались 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 [8].

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.

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 [9].

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 [10], [11].

## 2. Виды компоновочных схем линейного генератора со свободным поршнем

Компоновочные схемы ЛГСП, приведенные в таблице 2, можно классифицировать по следующим признакам:

- по количеству цилиндров (камер сгорания);
- по наличию или отсутствию пневматических отбойных камер;
- по наличию или отсутствию динамической сбалансированности.

Количество цилиндров определяется требуемой мощностью силового блока и заданной компоновкой.

Применение отбойных пневматических камер вызвано необходимостью аккумуляирования кинетической энергии поршневой группы для последующего такта сжатия. Они используются в известных экспериментальных установках, позволяя за счет изменения количества газа (воздуха) в камере динамично изменять степень сжатия и величину рабочего хода. Однако длительная работа такой установки представляется проблематичной, поскольку, несмотря на условия адиабатического сжатия-расширения газа в отбойной камере, он неизбежно будет сильно нагреваться, поглощая энергию из системы и вызывая необходимость высокотемпературной теплоизоляции. К тому же в отчетах по таким установкам о длительной работе последних не сообщается.

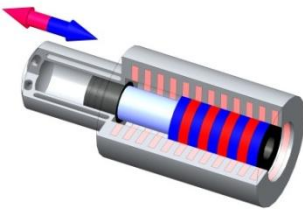
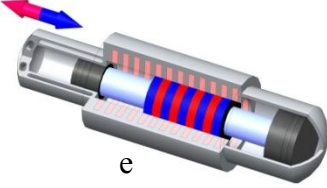
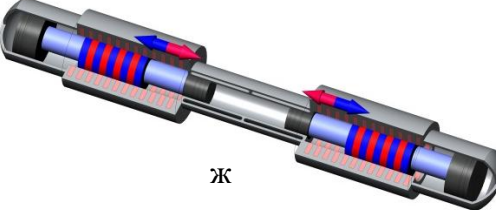
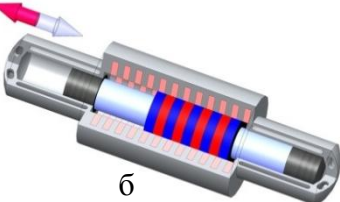
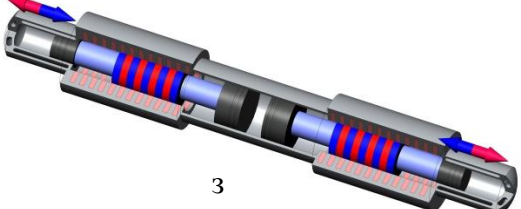
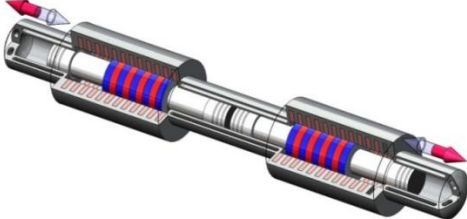
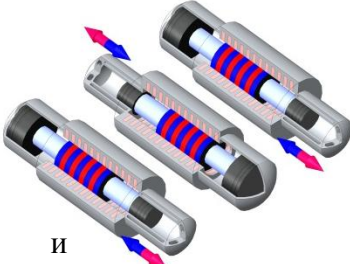
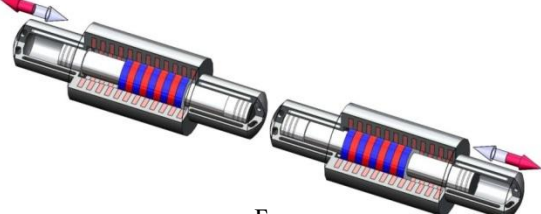
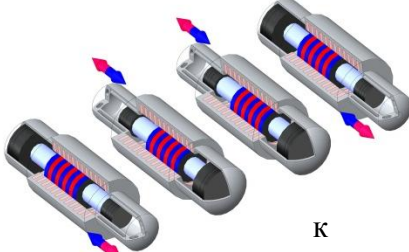
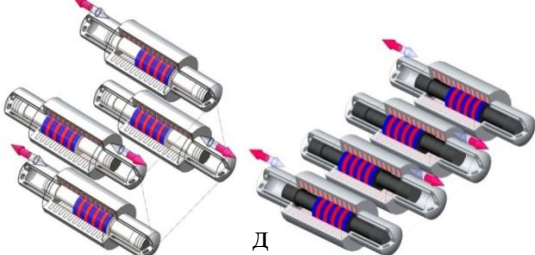
Требование динамической балансировки любой силовой установки, размещаемой на транспортном средстве, является одним из определяющих. Для этого используется комбинация модулей с противоположно движущимися поршневыми группами. В противном случае для применения установки необходимо использование демпфирующей подвески или системы демпферов.

На рис.1,а показан вариант конструкции, состоящей из одной камеры сгорания и линейного генератора. В этом варианте конструкции для возврата поршневой группы в исходное положение в такте сжатия в системе необходимо наличие аккумулятора электрической энергии (аккумуляторная батарея, суперконденсаторы). Линейная электрическая машина во время такта сжатия должна работать в двигательной режиме. Система является несбалансированной, однако решением может быть установка в вертикальном положении на демпфирующем основании.

Конструкция на рис.1,б была применена в европейском проекте FPES. Две камеры сгорания дают возможность непрерывной работы силовой установки, однако здесь имеется динамическая несбалансированность.

На рис.1,в показана конструкция из трех камер сгорания с противоположно движущимися поршневыми группами, являющейся динамически сбалансированной. Продольная компоновка вызывает увеличение продольного размера конструкции, что может стать проблемой при размещении ее в двигательном отсеке транспортного средства.

Таблица 2

Кол-во цилиндров	Без отбойной пневматической камеры	С отбойной пневматической камерой
1	 <p style="text-align: center;">а</p>	 <p style="text-align: center;">е</p>  <p style="text-align: center;">ж</p>
2	 <p style="text-align: center;">б</p>	 <p style="text-align: center;">з</p>
3	 <p style="text-align: center;">в</p>	 <p style="text-align: center;">и</p>
4	 <p style="text-align: center;">г</p>	 <p style="text-align: center;">к</p>
8	 <p style="text-align: center;">д</p>	
	<p style="text-align: center;">Рис.3 Схемы компоновок ЛГСП</p> <p style="text-align: center;">Варианты конструкций, обведенные жирными линиями, являются динамически уравновешенными.</p>	



Конструкции на рис.1,г и д представляют собой модульное решение силовой установки и являются сбалансированными. Исполнение на левом рисунке 1,д было применено в конструкции FP3.

В правом столбце таблицы 2 на рис.2,е-к показаны конструкции с пневматическими отбойными камерами. Конструкции на рис.2,ж-к являются динамически сбалансированными.

### 3. Динамика и резонансная характеристика линейного генератора со свободным поршнем

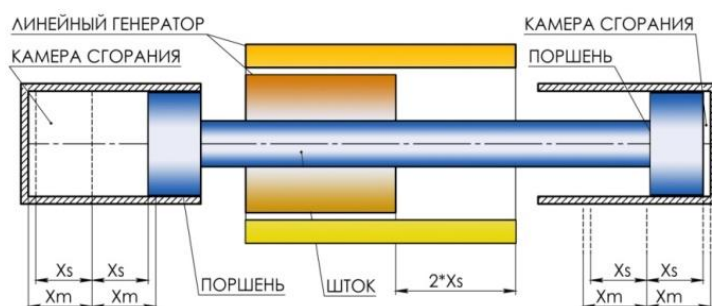


Рис.4 Расчетная схема ЛГСР

Для краткого анализа влияния конструктивных и газодинамических параметров рассмотрим динамику возвратно-поступательного движения подвижного элемента, включающего поршни, шток и подвижную часть электрической машины, принимая следующие допущения [12]:

1. Процессы впуска, выпуска рабочего тела и процессы сгорания происходят мгновенно при постоянном объеме;
2. Расширение и сжатие рабочего тела являются адиабатическими процессами;
3. Рабочий процесс описывается PV-диаграммой идеального цикла Отто.
4. Электрическая машина работает как однофазная машина.
5. В электрической машине не учитывается влияние межзубцового сцепления, эффект «магнитной пружины» и другие эффекты неравномерности распределения магнитного поля.

Основное уравнение динамики линейного возвратно-поступательного движения подвижного элемента записывается в виде уравнения баланса сил [12]:

$$P_L(x)S_B - P_R(x)S_B - F_E(x) - F_f(x) = m\ddot{x} \quad (1)$$

где  $P_L(x)$  – мгновенное давление в левом цилиндре;

$P_R(x)$  – мгновенное давление в правом цилиндре;

$F_E(x)$  – электромагнитные силы;

$F_f(x)$  – неэлектромагнитные силы трения;

$S_B$  – площадь поршня;

$m$  – масса подвижного элемента;

$\ddot{x}$  – положение подвижного элемента.

Проводя анализ термодинамического процесса, получаем развернутое уравнение динамики:

$$m\ddot{x} = S_B P_1 \left( \frac{2r}{r+1} \right)^n \left[ \left( 1 + \frac{x}{x_m} \right)^{-n} - \left( 1 - \frac{x}{x_m} \right)^{-n} \right] + \frac{Q_{in}(n-1)}{x_m - x_s} - F_E(x) - F_f(x) \quad (2)$$

где  $P_1$  – давление в цилиндре в конечной точке расширения;

$r = \frac{x_m + x_s}{x_m - x_s}$  – степень сжатия;

$x_m$  – координата средней точки;

$x_s$  – половина рабочего хода;

$n = \frac{c_p}{c_v}$  – коэффициент адиабаты;

$Q_{in}$  – количество переданного тепла в процессе сгорания;

Для анализа свободного колебательного процесса допустим, что сгорание, трение и электромагнитные силы равны нулю, тогда:

$$m\ddot{x} = S_B P_1 \left( \frac{2r}{r+1} \right)^n \left[ \left( 1 + \frac{x}{x_m} \right)^{-n} - \left( 1 - \frac{x}{x_m} \right)^{-n} \right] \quad (3)$$

Принимая  $\bar{x} = \frac{x}{x_m}$ , получаем уравнение в безразмерном виде:

$$\ddot{\bar{x}} = \frac{P_1 S_B}{m x_m} \left( \frac{2r}{r+1} \right)^n \left[ (1 + \bar{x})^{-n} - (1 - \bar{x})^{-n} \right] \quad (4)$$

Для анализа произведем линейное разложение функции  $[(1 + \bar{x})^{-n} - (1 - \bar{x})^{-n}]$  в ряд Тейлора вблизи точки  $\bar{x} = 0$ , ограничиваясь двумя первыми членами ряда. Получаем уравнение гармонических колебаний:

$$\ddot{\bar{x}} = -2n \frac{P_1 S_B}{m x_m} \left( \frac{2r}{r+1} \right)^n \bar{x} \quad (5)$$

Для удобства анализа заменим величину параметр  $x_m$ , используя более удобное значение величины рабочего хода  $L_s$ :

$$x_m = L_s \cdot \frac{r+1}{2(r-1)} \quad (6)$$

$$\ddot{\bar{x}} = -\frac{k_f}{m} \bar{x} \quad (7)$$

$$k_f = \frac{P_1 S_B}{L_S} \cdot 4n \left( \frac{r-1}{r+1} \right) \left( \frac{2r}{r+1} \right)^n$$

Тогда частота возвратно-поступательного движения  $f_{впд}$  в линеаризованном случае записывается как:

$$f_{впд} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_f}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{P_1 S_B}{m L_S} 4n \left( \frac{r-1}{r+1} \right) \left( \frac{2r}{r+1} \right)^n} \quad (8)$$

Двигатель со свободным поршнем ведет себя так же, как система из пружины и груза, где газ в камерах сгорания действует подобно нелинейным пружинам. Система из пружины и груза совершает возвратно-поступательное движение на собственной частоте и предпочтительно установить рабочую частоту близкой или равной этой частоте, так как это требует минимальной энергии.

Двигатель работает в двухтактном цикле, таким образом, каждый рабочий ход генерирует электрическую энергию. Следовательно, увеличение рабочей частоты дает в результате увеличение средней выходной мощности. Из (8) можно заключить, что для достижения высокой собственной частоты необходимо стремиться к уменьшению массы подвижного элемента  $m$ , длины рабочего хода  $L_S$ , а также к увеличению площади поршня  $S_B$ . Однако частота ограничивается временем протекания процесса сгорания, то есть, чтобы обеспечить достаточное время для воспламенения, сгорания и продувки, колебательная частота не должна быть слишком большой.

#### 4. Линейный электрический генератор.

В работе вращательных электрических машин, как двигателей, так и генераторов, особое внимание во время проектирования уделяется стабильности скорости вращения, как номинальному режиму работы. Разгон и торможение электрической машины рассматривается в качестве переходных кратковременных режимов работы.

Работа линейного генератора, наоборот, состоит из периодически повторяющихся разгона и торможения, меняющих свое направление. Вследствие этого работа линейного генератора носит существенно нестационарный характер, что отрицательно сказывается на КПД генератора. К тому же в отличие от вращающихся электрических машин,

линейная машина имеет краевые обмотки, создающие краевой эффект, также снижающий КПД генератора. Генерируемый электрический ток имеет, как правило, дополнительные гармоники, приводящие к снижению коэффициента мощности ( $\cos \varphi$ ), что накладывает дополнительные условия при проектировании преобразовательного устройства.

В связи с необходимостью иметь компактную компоновку электрической машины для использования в габаритах моторного отсека транспортного средства была выбрана синхронная цилиндрическая машина с возбуждением от редкоземельных постоянных магнитов, закрепленных на подвижном элементе. Пример компоновки электрической машины приведен на рис.5.

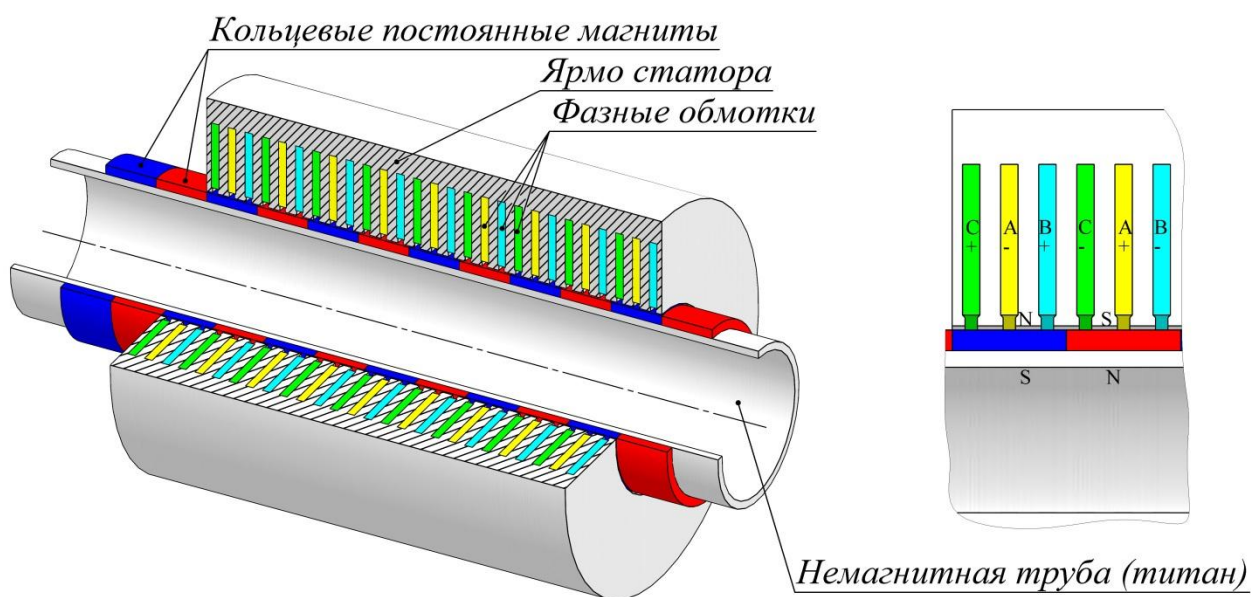


Рис.5 Схема линейной электрической машины

## 5. Система управления линейным генератором со свободным поршнем

Задача управления ЛГСП является многоуровневой. В случае использования ЛГСП в гибридных транспортных средствах можно выделить три уровня управления:

I. Система распределения энергии в тяговой системе транспортного средства, определяющая использование бортовых источников энергии – батарей (или суперконденсаторов) и преобразователя энергии углеводородов в электричество (ЛГСП в рассматриваемом случае) в виде кинетической энергии, реализуемой на колесах транспортного средства в определенных транспортных циклах движения. Полагая, что энергия, вырабатываемая первичным источником энергии (ЛГСП) накапливается в буферных аккумуляторах, можно считать, что работа ЛГСП не зависит от тягового цикла движения транспортного средства.

II. Система управления двигателем внутреннего сгорания посредством задания количества расхода топливно-воздушной смеси, соответствующей задаваемой мощности. Управление осуществляется управлением топливными инжекторами, воздушным дросселем и положением момента зажигания.

III. Система управления линейной электрической машины обеспечивает управляемое движение соединенных штоком поршней посредством задания токов в обмотках при достижении максимального КПД отводимой энергии, что осуществляется управлением IGBT силовыми мостами. На этом уровне управления непосредственно реализуется отдельный термодинамический цикл. Исходные параметры для каждого цикла поступают из системы уровня II (время начала и длительность впрыска топлива, время подачи импульса на зажигание).

Основными задачами системы управления линейной электрической машины являются:

- запуск двигателя;
- поддержание стабильного режима работы при постоянной нагрузке;
- компенсация пропусков зажигания;
- работа в переходных режимах;
- остановка двигателя;
- режим тестирования свойств топлива в процессе работы на основе базовой таблице свойств топлив для оптимизации термодинамического цикла.

Необходимо отметить, что вопрос построения системы управления по сравнению с другими аспектами линейного генератора со свободным поршнем, несмотря на его центральное значение, очень скудно освещается в научной литературе.

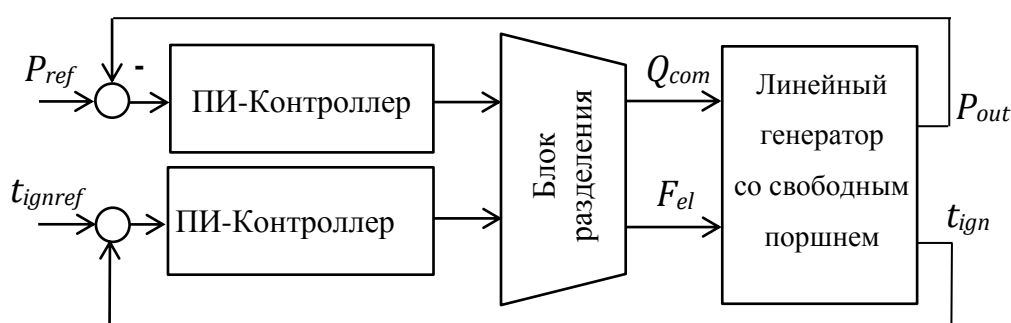


Рис. 6. Схема контроллера линейного генератора со свободным поршнем [12].

Иллюстрация структуры управления показана на рис. 6. Управляемыми переменными являются выходная мощность  $P_{out}$  и момент зажигания  $t_{ign}$ . Они

управляются посредством использования электрической силы машины  $F_{el}$  и энергии топлива  $Q_{comb}$ , как управляющих сигналов. Этот контроллер был разработан в ранних стадиях европейского проекта FPES и работа его происходит следующим образом:

1. Когда давление в камере сгорания достигает своего пикового значения в цикле сгорания запускающий сигнал (trigger signal) посылается в контроллер, таким образом контроллер запускает всякий раз на каждом рабочем ходе.

2. ПИ-контроллеры управляют временем зажигания  $t_{ign}$  и средней выходной мощностью  $P_{out}$ . Каждый раз запускаемые ими новые выходные значения посылаются в блок разделения.

3. FPES является системой с многими переменными и выходные сигналы  $P_{out}$  и  $t_{ign}$  зависят как от  $Q_{comb}$ , так и от  $F_{el}$ . Блок разделения пытается снизить эту перекрестную связь. Это достигается посредством использования матрицы со значениями, определяемыми из RGA-анализа, подробно излагаемого в теории управления со многими переменными.

4. После разделения соответствующие значения  $Q_{comb}$  и  $F_{el}$  посылаются как входы для FPES.

## 6. Использование альтернативных видов топлива

Как уже упоминалось выше, линейный генератор со свободным поршнем, благодаря возможности изменения степени сжатия в процессе работы и организации оптимального термодинамического процесса сгорания топлива, потенциально способен работать на разных видах топлива. Для этого необходимо изменять настройки в электронной таблице свойств топлив контроллера. Кроме того, контроллер, работая в режиме тестирования характеристик топлива (адаптивный режим), способен получить термодинамические характеристики топлива, загрузить их в электронную таблицу и оптимизировать сам термодинамический цикл.

В двигателе со свободным поршнем, управляемым линейным генератором, с гибким термодинамическим циклом возможно достижение режима воспламенения от сжатия гомогенного заряда - режима сгорания бедных смесей. Коэффициент избытка топлива бедной смеси около 0,3. Реализация его в обычных двигателях весьма затруднительны, поскольку нужно сочетать высокую степень сжатия, сравнимую с дизельным циклом, большую однородность и точную температуру топливно-воздушной смеси.

За счет однородного сгорания топлива и наличия многих центров воспламенения время сгорания быстрее, чем в воспламенении от искры или от сжатия (дизель), что повышает эффективность термодинамического цикла и снижает выбросы окислов азота.

В работе [2] сообщается об эксперименте использования биогаза, представляющего собой бедную смесь водорода, окиси углерода, метана, недостаточную для воспламенения в искровом зажигании, а для сжигания в дизельном двигателе требовалось дополнительное топливо. Результат показал превосходную эффективность двигателя со свободным поршнем.

## 7. Заключение

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. Однако, к счастью все эти технологии можно считать на сегодняшний день достаточно глубоко разработанными и вопрос в разумном синтезе систем. Хотелось бы надеяться, что научный приоритет России в этой области не будет упущен.

## Список литературы

- [1] Land transport and marine technologies, "RTD activities supported under the Growth Programme (p.20, FPEC)," 2002.
- [2] P.V.Blarigan, "Advanced internal combustion electrical generator," *Proceedings of the 2001 DOE Hydrogen Program Review*, 2001.
- [3] O. V. P. Němeček\*, "Control of two-stroke free-piston generator.," *Faculty of Electrical Engineering, Czech Technical University Prague, Czech Republic*, 2007.
- [4] W.M.Arshad, C.Sadarangani, T.Bäckström, P.Thelin, "Finding an Appropriate Electrical Machine for a Free Piston Generator," Department of Electrical Engineering KTH, the Royal Institute of Technology, Stockholm, SWEDEN, 2002.
- [5] Y. Liu, M. Leksell, W. M. Arshad, P. Thelin, "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.
- [6] "www.sunpower.com," [Online].
- [7] P.V.Blarigan, "Project Free-Piston Engine," 2011 DOE Vehicle Technologies Program Annual Merit Review, 2011.
- [8] C.M. Atkinson and all, "Numerical Simulation of a Two-Stroke Linear Engine-Alternator Combination," SAE TECHNICAL PAPER SERIES, March, 1999.
- [9] O. Vysoký, "Linear Combustion engine as main energy unit for hybrid vehicles," TRANSTEC Prague, 2007.
- [10] D. Carter, E. Wechner, "The Free Piston Power Pack: Sustainable Power for Hybrid The Free Piston Power Pack: Sustainable Power for Hybrid," Pempek Systems Pty. Ltd., Australia, 2003.
- [11] [www.freepistonpower.com](http://www.freepistonpower.com)
- [12] [www.centaurproject.com](http://www.centaurproject.com)
- [13] J.Hansson, " Analysis and control of a hybrid vehicle powered by a free piston energy converter.," *Licentiate thesis in electrical system, Royal institute of technology (KTH), Stockholm, Sweden, , 2006.*