

## Система управления двухтактного генератора со свободным поршнем

**P. Němeček\*, O. Vysoký\*\***

*Control Of Two-Stroke Free-Piston Generator*

*Faculty of Electrical Engineering, Czech*

*Technical University*

*Prague, Czech Republic*

*e-mail: \*nemecek1@fel.cvut.cz,*

*\*\*vysokyo@fel.cvut.cz*

Перевод Духанин В.И.

Сайт <http://centaurproject.com/>

Аннотация: В этой статье описывается модель генератора со свободным поршнем (ГСП) (Free-Piston Generator - FPG) и его система управления для достижения устойчивой работы. ГСП является особым типом двигателя внутреннего сгорания, представляющим новый подход, касающийся преобразования химической энергии углеводородного топлива в электрическую энергию. В отличие от традиционных двигателей этот тип двигателя не использует коленчатый вал, а генерирует электрическую энергию непосредственно посредством линейного движения поршней.

### 1.1 Введение в задачу ГСП

ГСП представлен здесь в виде двухтактного, двух цилиндрового двигателя внутреннего сгорания. В отличие от традиционных двигателей у ГСП не имеется коленчатого вала (часто название «двигатель со свободным поршнем» используется в этом смысле). Подвижная часть ГСП состоит только из двух поршней, соединенных штоком и двигающихся от одной стороны до другой. Существуют также другие конструкции двигателей со свободным поршнем, например, только с одним цилиндром и пружиной на противоположной стороне. Эти конструкции в этой статье не рассматриваются.

Отсутствие коленчатого вала является полезным фактором. Потери трения, связанные с коленчатым валом, традиционным соединительным штоком и их элементами исключаются, и также упрощается смазка. Трение поршня снижается, так как он больше не находится под действием угловой нагрузки. Система становится также более надежной, так как количество движущихся частей снижается до одной. Поскольку степень сжатия двигателя теперь более не фиксирована, по крайней мере, теоретически, возможна работа с разными топливами. Также может достигаться работа с переменным сжатием с одним и тем же типом топлива. Также становится возможным подход к модульной конструкции с

несколькими распределенными блоками, дающими резервирование и улучшенную надежность.

Во время работы ГСП поршень ускоряется вследствие сгорания топливной смеси и движется от одной стороны к другой. Освобождаемая энергия частично используется для сжатия топливной смеси в противоположном цилиндре. Это действие периодически повторяется. Разность между энергией, освобождаемой при сгорании смеси, и энергией потребляемой на сжатие смеси и механическими потерями отводится из системы, в качестве электрической энергии посредством линейного мотор-генератора, который также используется и как стартер во время запуска ГСП. Наконец, мотор-генератор также позволяет предотвратить остановку ГСП во время пропуска зажигания.

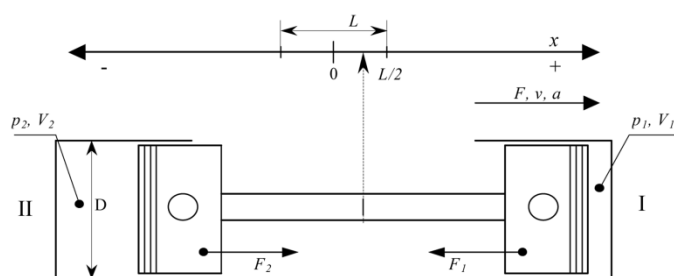


Рис.1 Упрощенная схема ГСП – определение постоянных и переменных

возможные пропуски зажигания и соответственно вмешиваться, работая, таким образом, подобно маховику. Это представляет главную задачу, связанную с возможностью ГСП. Параметры управления должны также максимизировать электрическую энергию, отводимую от ГСП.

Главные недостатки традиционного двухтактного двигателя (например, более высокая степень загрязняющих выбросов и неравномерность низкой скорости) должна быть частично исключена посредством использования точной системы смешивания топлива (например, вспомогательная воздушная инжекция топлива). Главной областью применения ГСП являются так называемые гибридные транспортные средства.

Было опубликовано множество статей, которые рассматривают комбинированную систему линейного генератора переменного тока и двигателя сгорания, однако большинство из этих работ касаются сопряжения линейного генератора переменного тока и двигателя Стирлинга [3]. Конструкция с двумя оппозитными цилиндрами и двухтактным циклом описана в [1] и [2], однако эти работы сфокусированы в основном на моделировании, а управление не рассматривается. Другая конструкция с одним поршнем и пружиной обсуждается в [4] и [5]. Эти конструкции позволяют применение

Поскольку движение подвижной части не ограничено коленчатым валом, контроллер должен давать возможность точного управления положением подвижной части, для того чтобы избежать столкновения между поршнем и головкой цилиндра. Контроллер должен также обнаруживать

четырёхтактного цикла, однако в этом случае необходима внешняя электрическая энергия для устойчивой работы.

Прототип ГСП использует два цилиндра объемом  $50 \text{ см}^3$  с прямой инжекцией топлива. Линейный мотор-генератор производства компании VUES company и приводится в действие через трехфазный силовой мост с IGBT-транзисторами. Рисунок ГСП показан на рис.2.

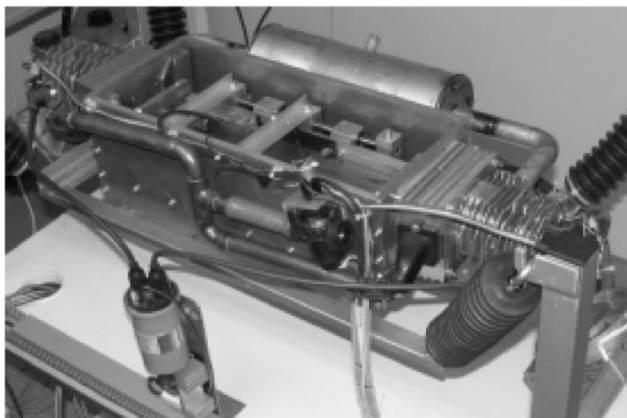


Рис.2 Реальная модель ГСП.

Для измерения положения использован промышленный инкрементальный магнитный датчик. Максимальная измеренная скорость равна  $5 \text{ м/с}$  с точностью  $100 \text{ мкм}$ . Для измерения входного давления воздуха применен датчик давления. Преобразователи тока воспринимают токи, протекающие через обмотки мотор-генератора.

Блок зажигания конденсаторного типа и имеет только одну катушку зажигания. Искра возникает всегда одновременно в обеих свечах зажигания, однако процесс сгорания может начинаться только в цилиндре с топливной смесью.

В ГСП использованы инжекторы DiTech technology с методом воздушной вспомогательной топливной инжекцией (производство Aprilia Company). Топливная инжекция имеет две фазы, обслуживаемые электромагнитными клапанами. Во-первых, точное количество топлива подготавливается в маленькой камере. Во второй фазе сжатый воздух используется для распыления топливной смеси в камере сгорания.

Все описанное оборудование было соединено с dSpace через интерфейсную плату, которая давала возможность преобразования уровня напряжения и защиты всех входов и выходов dSpace.

## 2.1 Управление ГСП

Задача управления является многоуровневой. В основном мы рассматриваем три уровня (в случае использования ГСП в гибридных транспортных средствах). Верхний уровень состоит в распределении энергии транспортного средства, которое определяет использование бортовых источников энергии – батарей (или суперконденсаторов) и преобразователя энергии углеводов в электричество (ГСП в этом случае). В настоящей статье этот уровень не рассматривается. Средний уровень управляет

количеством топливно-воздушной смеси, чтобы сгореть соответственно требованиям мощности. Это сделано посредством управления топливными инжекторами, воздушным дросселем и положением момента зажигания. Он также отвечает за выбросы и удержание отношения лямбда равном 1 (приблизительно). Нижний уровень управляет движением соединенных штоком поршней при обеспечении максимального КПД отводимой энергии. Это делается соответствующим управлением IGBT силовыми мостами. Этот уровень также отвечает за преодоление пропусков зажигания (предотвращая остановку ГСП из-за пропусков зажигания) и за предотвращение столкновения между поршнями и головками цилиндров. Отметим, что по сравнению с обычными двигателями линейное движение не ограничено. Поэтому основная задача состоит в предотвращении столкновения. Измеряемыми рабочими параметрами системы являются положение соединительного штока, скорость штока, давление воздуха на входе, массовый расход воздуха на входе и ток, протекающий через катушки мотор-генератора.

### 1.3 Описание системы управления HW

В этом случае для нижнего и среднего уровней управления был использован мощный ПК Motorola PowerPC, основанная на системе произведенной и питаемой DSPACE Company. Современные высокоуровневые конструктивные методы используют Real Time Workshop, Matlab и Simulink для точного управления в режиме реального времени. Главное преимущество этого подхода высокого уровня состоит в коротком времени реализации управляющих алгоритмов по сравнению с основанными на разработке приложений на языке C или языке ассемблера. Управляющие алгоритмы, которые испытаны на модели Simulink, могут быть также использованы непосредственно для управления прототипом.

Dspace DSP включает аналоговые и цифровые входы и выходы. Было создано дополнительное аппаратное обеспечение для обеспечения взаимодействия с реальной моделью. Блок-схема этого аппаратного обеспечения показана на рис.3.

Для экспериментальной части разработки использовался силовой переключатель вместо аккумулятора с соответствующим силовым управлением. Главная функция этой цепи состоит в идентификации и управлении потоком электрической энергии. Трехфазный силовой мост (управляемый посредством DSP) питался через выпрямитель и диод D (рис.4). Когда же мотор-генератор был в режиме генератора, напряжение на конденсаторе C2 было выше, чем напряжение на C1. Чтобы избежать превышения напряжения на C2 сверх его пикового напряжения, использовался нагрузочный резистор. Если разность напряжений  $U_{C2}-U_{C1}$  превышает установленный предел, энергия

направлялась в этот резистор. Рассеяние мощности на нем равно мощности, получаемой от ГСП.

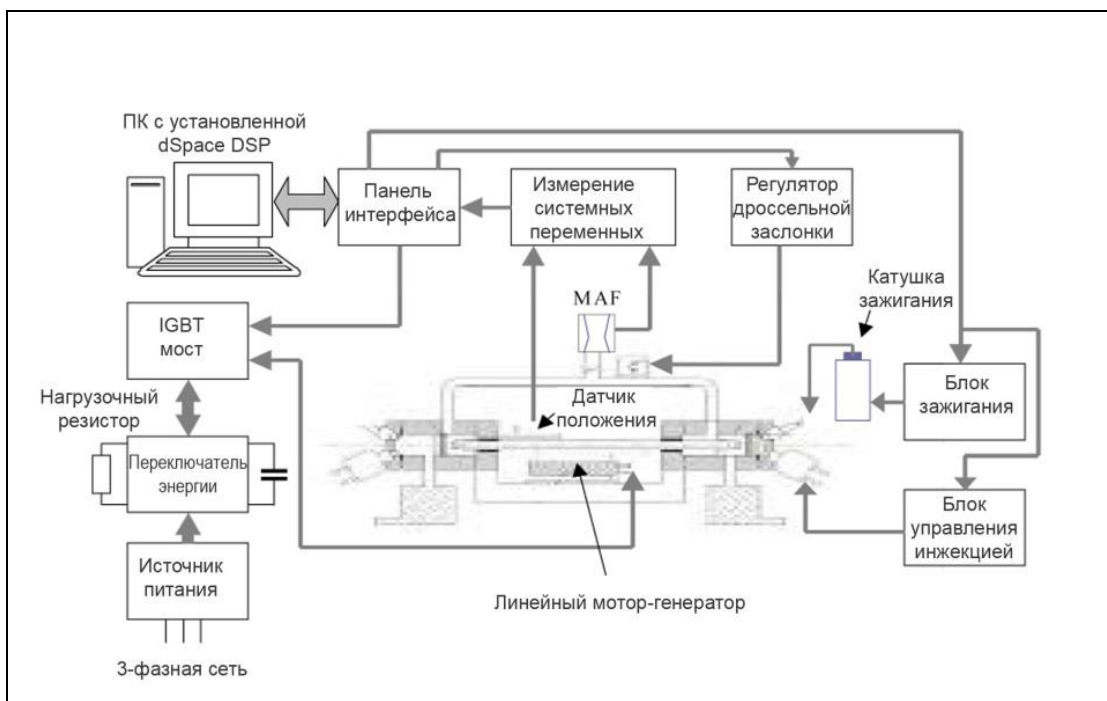


Рис.3 Расширенная блок-схема аппаратного обеспечения

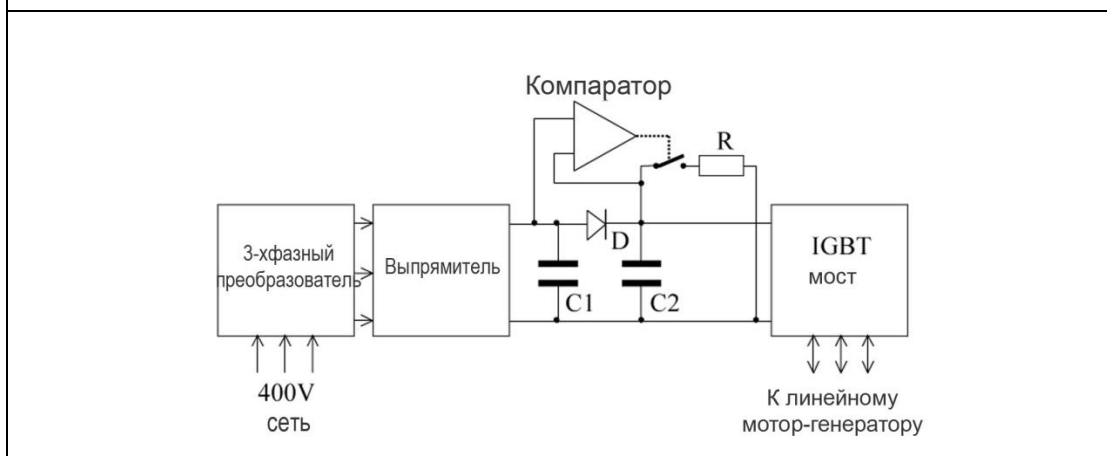


Рис.4 Блок-схема силового переключателя

### 2.3 Управляющий алгоритм

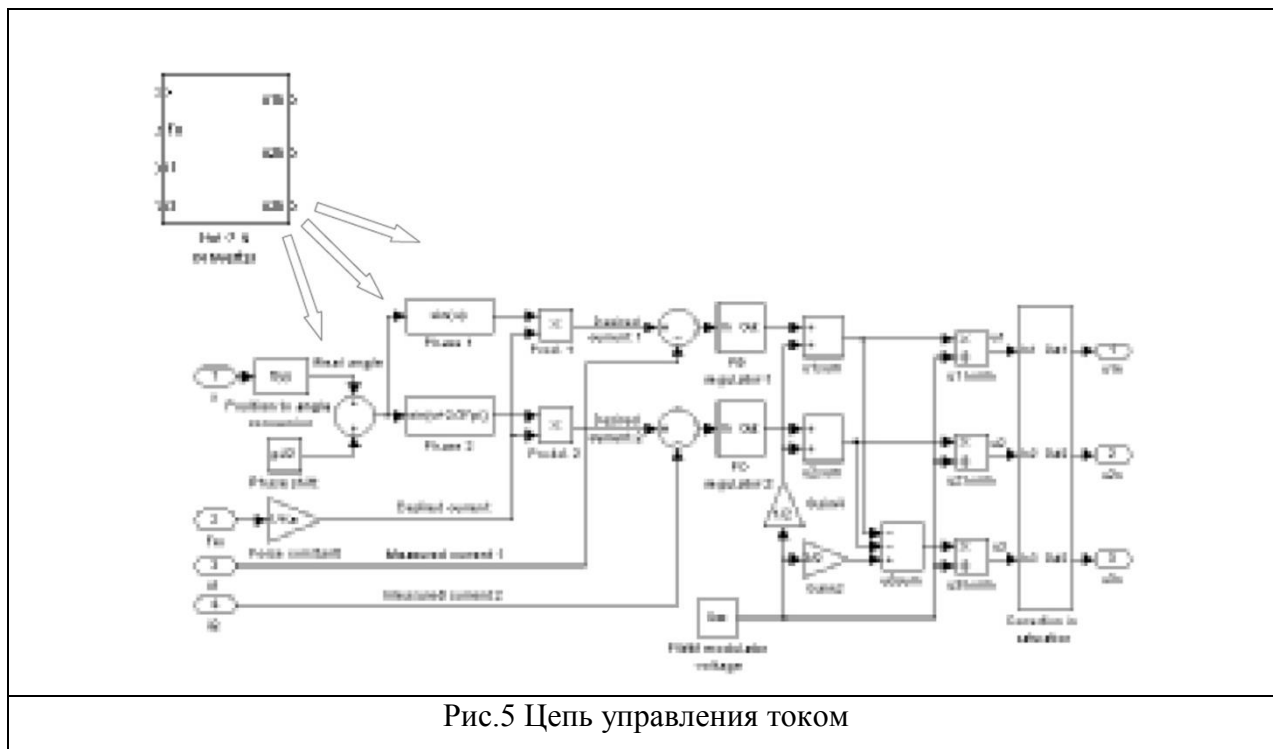
В настоящее время мы рассматриваем управление только линейным мотор-генератором, а двигатель внутреннего сгорания работает только в одном режиме на постоянной скорости. Таким образом, такие параметры как момент зажигания, соотношение топливно-воздушной смеси и т.д. установлены как постоянные величины, значения которых базируются на экспериментальной системной идентификации. Управление мотор-генератором дает возможность удерживать поршни в некоторых пределах, таким образом, обеспечивать устойчивую работу всего прототипа ГСП.

Для управления движением линейного мотор-генератора используются две цепи управления. Внешняя цепь обеспечивает отслеживание требуемой траектории. Выходными значениями этого регулятора являются требуемая сила, которая должна генерироваться посредством линейного мотор-генератора. Эта сила зависит от мгновенных токов через катушки мотор-генератора, таким-образом, необходима другая регулирующая цепь для обеспечения соответствующая управления током (мотор-генератор питался посредством напряжения от ШИМ-модулятора).

### 2.3 Цепь управления током

Поскольку имеются зависимости между индивидуальными фазами трехфазного мотор-генератора, обратная связь встраивается только для двух фаз, чтобы избежать антагонистических конфликтов в регуляторе, а последний сигнал вычислялся из этих двух.

Во-первых, реальный угол (угол аналогичный вращающейся машины) вычисляется



из реального положения соединительного штока, соответствующего геометрии мотор-генератора (шаг полюсов, количества обмоток и т.д.) Требуемая сила делится на постоянную мотор-генератора  $K_a$ , чтобы получить требуемый ток.

$$I = \frac{F}{K_a} \quad (1)$$

Два ПД регулятора использованы для отслеживания требуемых токов. Для лучшей аппроксимации производной FIR использовался фильтр. Выходное напряжение регулятора нормализовалось к значению от 0 до 1 (это необходимо для блока ШИМ модулятора). Третья фаза получалась из других двух соответственно уравнению:

$$\sin(\varphi) = -\sin\left(\varphi + \frac{2}{3}\pi\right) - \sin\left(\varphi - \frac{2}{3}\pi\right) \quad (2)$$

## 2.4 Цепь управления положением

Этот контроллер должен обеспечивать следующие функции:

- Предотвращение столкновения между поршнем и головкой цилиндра;
- Максимизация отводимой электрической мощности в каждом цикле;
- Предотвращение остановки ГСП, когда происходят пропуски зажигания;
- Запуск ГСП (соответственно настоящему состоянию ГСП).

Из характера системы ясно вытекает, что она не может быть заставлена двигаться с точной частотой, потому что имеется некоторая случайная часть в поведении двигателя внутреннего сгорания. Таким образом, опорная траектория должна быть адаптирована к реальному состоянию системы. Структура регулятора показана на рис.6.

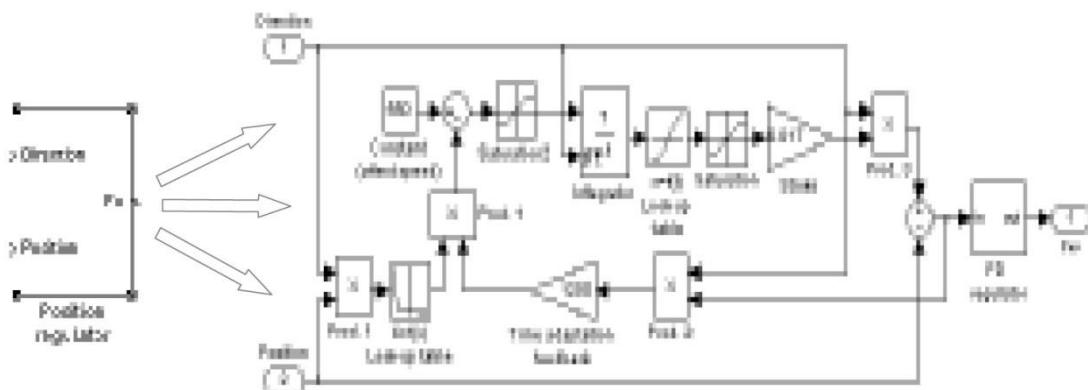


Рис.6. Цепь управления положением.

Сигнал ramпы, создаваемый интегратором, используется как вход для таблицы преобразования, которая оказывает воздействия на траекторию движения ГСП. В то же время он содержит канавочную часть синусоидального сигнала, однако в основном он может содержать также другую траекторию. Умножение на 1 или -1 дает точную опорную траекторию в обоих направлениях. Эта траектория очень похожа на синусоидальную, однако разрывности, вызванные неопределенностью определения реального направления. Постоянная на входе интегратора устанавливает требуемую скорость ГСП. Простой ПД регулятор используется для отслеживания опорной траектории (выходной параметр – сила). Как и в предыдущем случае, для аппроксимации производной используется FIR фильтр.

Для адаптации опорной траектории используется дополнительная обратная связь. Она обеспечивает адаптацию масштаба времени, соответствующего реальной ошибки регулирования. Поскольку важно только положение мертвых точек, мы можем позволить большую свободу системы после сгорания, однако траектория вблизи мертвой точки должна быть жестко задана. Для этой характеристики имеется другая таблица



преобразования, которая представляет зависимость постоянной времени адаптации при реальном положении.

Для точного функционирования предыдущего контроллера должна быть получена производная реального направления от датчика положения. Это обеспечивается блоком «Коммутатор», структура которого показана на рис.7. Другой важной функцией является инициализация контроллера и энкодер для инкрементального датчика положения. Вход «Опорная метка» (“Ref. Mark”) присоединяется к реальному датчику на прототипе. Его значение 0 для положения соединительного штока на левой стороне и 1 в другом случае. Он позволяет запустить движение ГСП в правильном направлении. Скорость получается как отфильтрованная производная положения. Запуск ГСП определяется как первое появление ненулевой скорости. После каждого запуска генерируется короткий импульс на выходе направления для переустановки интеграторов в регуляторах и моделях. Энкодер положения переустанавливается только однажды после старта (для этой цели используется S-R триггер). Релейная функция делает возможным изменение направления только после момента (положения) зажигания (защита против некорректного изменения направления вследствие шума в сигнале положения).

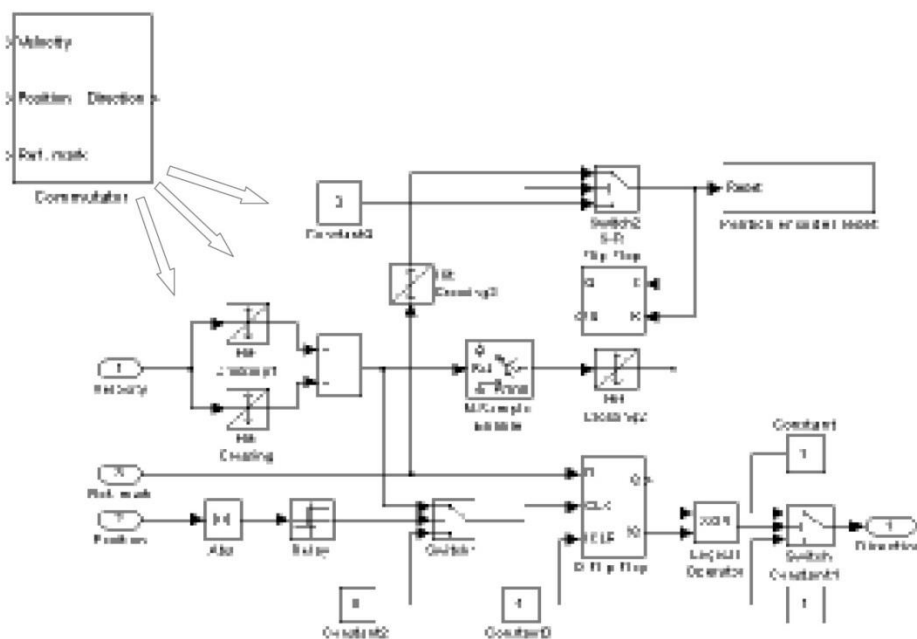


Рис.7 Блок-схема коммутатора

Все описанные блоки скомбинированы вместе в общей блок-схеме. Она содержит также математическую модель ГСП [6]. Структура позволяет простое переключение между симуляцией и управлением в реальном времени.

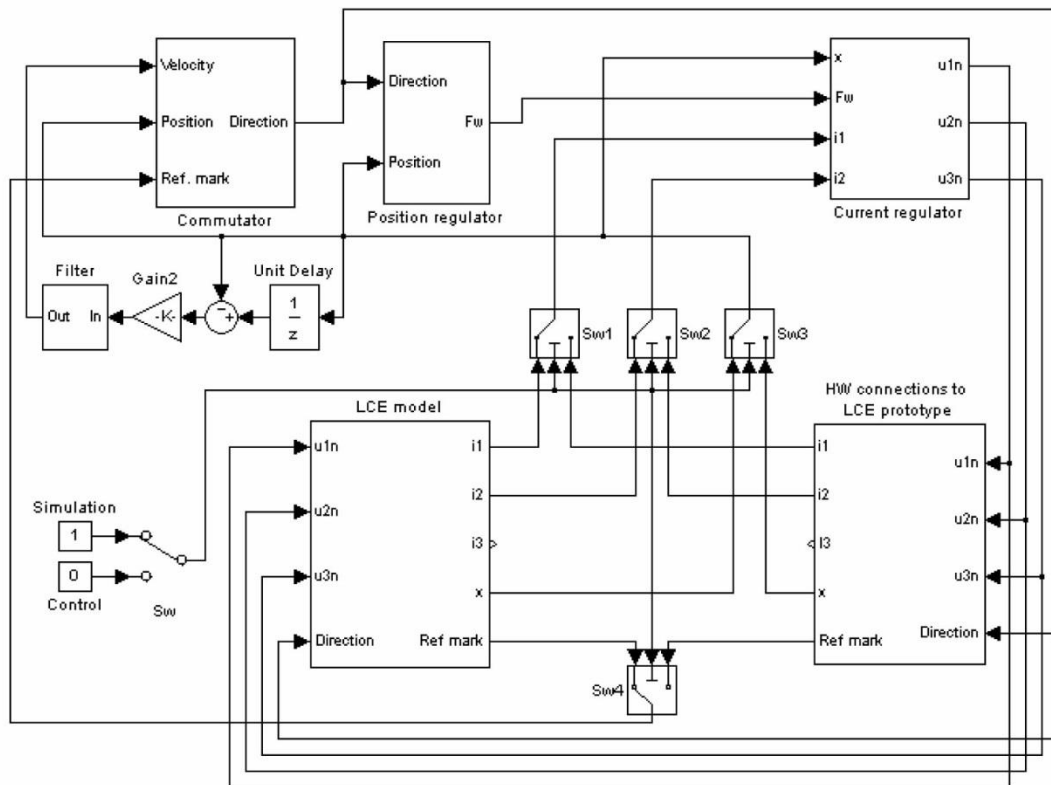


Рис.8 Общая блок-схема моделирования

### 3. Экспериментальные результаты

Для экспериментальной цели датчик давления был размещен непосредственно в головке цилиндра. Это дало возможность получить зависимость P-V и сравнить ее с результатом моделирования той же зависимости P-V. К сожалению, зависимость P-V была измерена во время, когда ГСП не работал устойчиво (датчик давления был взят на время). Таким образом, результаты от датчика давления являются только для информации и не соответствуют другим результатам на рис.10-13.

При новой системе управления, описанной выше, была достигнута длительная устойчивая работа. Следовательно, мы получили много новых экспериментальных результатов, к несчастью без соответствующего оборудования мы были не в состоянии идентифицировать параметры двигателя внутреннего сгорания. Таким образом, результаты касались, в основном, электрического мотор-генератора и общей характеристики ГСП. В будущем мы планируем измерить давление в камере сгорания и в камере под поршнем, массовый расход воздуха, давление во впускном патрубке, расход топлива и проанализировать состав выхлопных газов. Это позволит провести лучший термодинамический анализ двигателя сгорания.

Сравнение между экспериментальными и смоделированными P-V графиками показано на рис.9. Ступенька давления в моделированном графике является результатом

допущения, что выпускное отверстие открывается за бесконечно короткое время. Положение зажигания находится, очевидно, на кривой сжатия. Может быть также рассмотрен другой факт – ограниченная скорость распространения пламени.

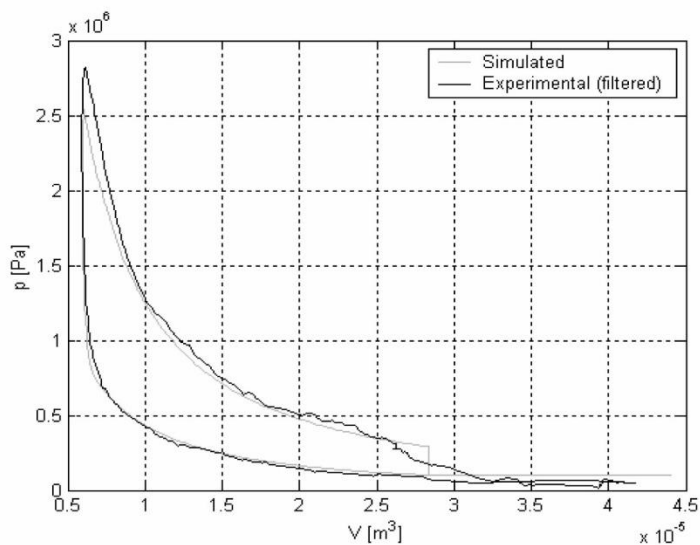


Рис.9 Экспериментальная и смоделированная P-V диаграмма.

определения реального направления. Отметим, что форма опорной траектории не идеальная, однако она позволяет работать ГСП устойчиво и также решает возможные проблемы пропуска зажигания.

Более информативен следующий рисунок. Он показывает зависимость между скоростью и положением соединительного штока. Один цикл ГСП проходит в направлении по часовой стрелке. Функция сверху, описывающая регулятор, хорошо заметна – после верхних мертвых точек имеют различия в отдельных циклах (регулятор обеспечивает большую свободу для системы), однако мертвые точки достигаются очень точно. Отклонения (складки) на экспериментальных данных вызваны открыванием впускного и выпускного отверстий (этим вызывается ступенчатое изменение давления в цилиндре) и вмешательством регулятора в этой ситуации. Отметим, что скорость получается как производная положения и, таким образом, также имеется некоторая неточность (скорость на рис.11 везде фильтруется фильтром низких частот). При сравнении результатов с рис.10 видно, что изменение скорости имеет очень малое влияние на форму реальной траектории.

Все последующие результаты были получены при тех же самых условиях. Скорость равна приблизительно 27 Гц (1600 об/мин), положение зажигания -  $x_z = 15,5$  мм (верхняя мертвая точка – 18,5 мм) и степень сжатия  $\varepsilon = 9$ .

На следующем рисунке показаны опорная и реальная траектории соединительного штока. Разрывности в опорной траектории являются следствием неточности

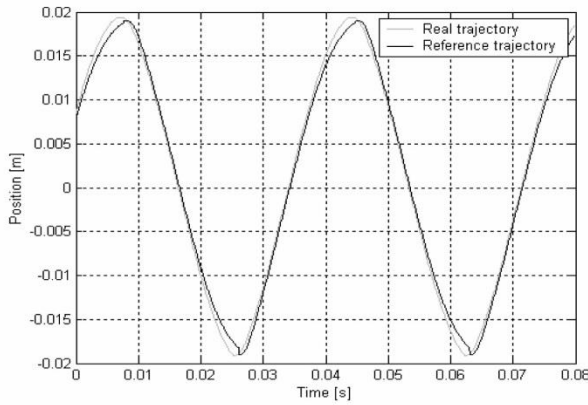


Рис.10 Опорная и реальная траектории соединительного штока

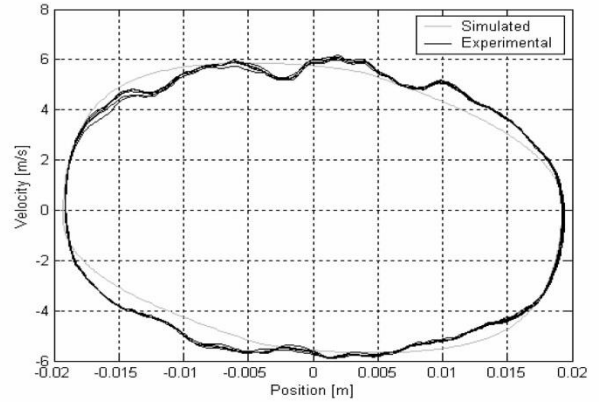


Рис.11 Скорость как функция положения

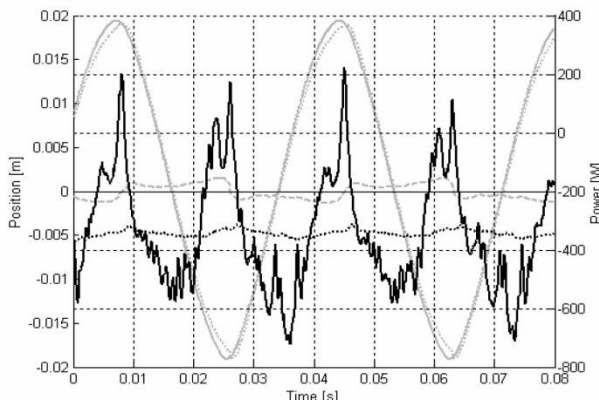


Рис.12 Реальная выходная мощность как функция положения – экспериментальные данные

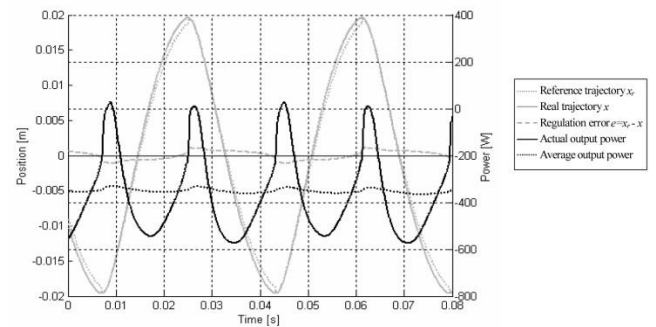


Рис.13 Реальная выходная мощность как функция положения – данные моделирования

Так как цель настоящего проекта состоит в максимизации отводимой электрической энергии (следовательно, КПД), главная задача заключается в использовании энергии сгорания в цикле. Следующий рисунок на левой оси опорную траекторию  $x_r$  (черная), реальную траекторию  $x$  (голубая) и ошибку регулирования  $e = x_r - x$  (зеленая). На правой оси – реальная мощность (красная) и общая мощность от 1000 примеров (сиреневый). Положительные значения означают, что электрическая мощность поступает в систему. Очевидно, что общая выходная мощность равна приблизительно 350 Вт. То же значение было также измерено посредством аналогового ваттметра, присоединенного непосредственно к нагрузке. Реальная мощность зависит от реальной ошибки регулирования. Идеальный случай, когда опорная траектория всегда предшествует реальной траектории, потому что электрическая энергия отводится из системы посредством торможения. Однако, если требуемая тормозящая сила превышает некоторый предел, (зависит от реальной скорости и постоянных мотор-генератора) необходима дополнительная электрическая энергия (в нашем случае это происходит после

сгорания), что является нежелательной ситуацией. Конструкция управляющего алгоритма, который максимизирует отводимую электрическую энергию, является главной задачей всего проекта. Представленное здесь решение не является оптимальным, однако обеспечивает устойчивую работу ГСП и может быть использовано в качестве базовой работы для дальнейших исследований.

На последнем рисунке показаны те же самые переменные, полученные из моделирования. Форма реальной мощности более сглаженная (не влияют ошибки измерения), однако результаты похожи. Также общая выходная мощность очень близка к значению, полученному из реального прототипа.

#### 4. Заключение

Хотя прототип в настоящее время еще очень сырой, имеется возможность проводить эксперименты, которые очень важны для дальнейших исследований. В настоящее время была достигнута устойчивая работа ГСП, которая продемонстрировала возможность проекта ГСП. Предыдущая работа также показала проблемы современной конструкции ГСП. Главной задачей является электрический мотор-генератор, поскольку его параметры не достаточны для отвода энергии от двигателя внутреннего сгорания. Таким образом, могут быть использованы только бедные топливные смеси (тормозящая сила мотор-генератора недостаточно высока) и он имеет негативное влияние на КПД ГСП. Главной проблемой также является конструкция управляющего алгоритма, который максимизирует отводимую электрическую энергию и одновременно обеспечивает устойчивую работу ГСП (также в случае пропуска зажигания).

В основном генератор со свободным поршнем кажется перспективным устройством в области преобразования химической энергии углеводородного топлива в электрическую энергию. При некоторых существенных улучшениях в настоящей конструкции он может обещать преимущества над традиционно используемыми вращательными системами.

Благодарности

Проект поддержан исследовательским центром “Božek Research Center of Engine and Automotive Engineering”

Список литературы

- [1] W.R. Cawthorne, Optimization of a Brushless Permanent Magnet Linear Alternator for Use With a Linear Internal Combustion Engine, PhD Thesis, West Virginia University, 1999.
- [2] N.N. Clark, P. Famouri, Modeling and development of a linear engine, In 1998 Spring Technical Conference of the ASME Internal Combustion Engine Division, vol. 30-2, 1998.

- [3] J.C. Holliday, S.G. Howell, M. Ritcher, Free-Piston Linear Alternator Solar Stirling Engine Concept, Proceedings of the 21<sup>st</sup> Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 1986, pp. 468-473.
- [4] J.F. Kos, Computer optimized hybrid engine, United States Patent 5002020, 1991.
- [5] X. Zhang, Modeling and simulation of a hybrid engine, Master's thesis, University of Regina, 1997.
- [6] P.Němeček, M.Šindelka, O.Vysoký, Modeling and control of free-piston generator, Preprints of 3rd IFAC Symposium on Mechatronic Systems, 2003, pp. 651-656.