

УДК 631.3

Свободнопоршневые конструкции – одно из перспективных направлений совершенствования силовых установок транспортных средств

М.Л.Шуляк

*Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства
имени Петра Василенка (Харків, Україна)*

Проведен анализ возможных направлений совершенствования двигателей внутреннего сгорания, рассмотрены позитивные и негативные аспекты применения свободнопоршневых установок, выявлены причины препятствующие массовому использованию данного типа механизмов и предложен путь их развития.

Ключевые слова: *двигатель внутреннего сгорания, кривошипно-шатунный механизм, цилиндро-поршневая группа, гибридная установка, свободнопоршневая энергетическая установка*

Вступление. История совершенствования двигателя внутреннего сгорания (ДВС) - длительный путь постоянного усложнения систем, обслуживающих термодинамические процессы в камере сгорания машины объёмного вытеснения с кривошипно-шатунным механизмом. В традиционной силовой установке среди нагружения этих систем практически не виден сам двигатель, структурная схема основного механизма которого осталась неизменной со времён Лемуара, Отто, Бенца и Даймлера.

Существует своеобразное "табу" на основной механизм ДВС: можно как угодно усложнять конструкцию основного механизма и различных связанных с ним систем газообмена, впрыска топлива и т.д., но нельзя добавить ни одно "лишнее" звено в структурную схему кривошипно-ползунного механизма.

Однако при поиске новых механизмов ДВС следует стремиться к минимизации числа деталей с оценкой возможности их массового производства.

Пренебрежительное отношение к требованиям массового производства в некоторой степени объясняет судьбу большинства патентных материалов по усовершенствованию ДВС поколений изобретателей разных стран. Предложения, значительно усложняющие кинематическую схему традиционного основного механизма двигателя, также как и оригинальные механизмы машин объёмного вытеснения, не дающие эффекта, оправдывающего затраты на их освоение и внедрение в массовое производство, обычно не реализуются даже в виде опытных образцов.[1].

Постановка задачи Современный ДВС по определению не самый выдающийся продукт с точки зрения технологий. Это значит, что его можно совершенствовать до бесконечности» (Мэтт Тревитник, президент венчурного фонда семьи Рокфеллер Venrock) [2].

Кривошипно-ползунный механизм – источник многих принципиальных недостатков [1]:

1. Механизм обеспечивает возможность реализации далеко не идеального термодинамического процесса при постоянно изменяющемся рабочем объёме.

2. Механизм не обеспечивает возможность преобразования максимальной нагрузки на поршень в крутящий момент на валу при нулевом эффективном плече.

3. Механизм одноцилиндрового двигателя кинематически неработоспособен, необходимо применение лишней массивной детали - маховика.

4. Нагрузка поршня на цилиндр существенно ограничивает работоспособность и ресурс двигателя.

5. Быстротекущие процессы расширения-сжатия определяют политропный процесс преобразования тепловой энергии, существенно отличающийся от идеального.

6. Повышение частоты вращения и степени сжатия, как способ увеличения литровой мощности двигателя, приводит к снижению его термодинамического совершенства.

Как следствие имеется объективная причина поиска принципиально новых механизмов двигателей силовых установок.

Основная часть. Современные поршневые силовые агрегаты транспортных средств представляют собой сложные системы механизмов, обеспечивающих не только преобразование возвратно-поступательного движения поршня во вращательное движение выходного вала, но и процесс смесеобразования, воспламенения топливно-воздушной смеси, охлаждение цилиндров и т.д.[1].

Основной механизм машины объёмного вытеснения ДВС циклически изменяет объём рабочей камеры, обеспечивая возможность преобразования энергии рабочей смеси в механическую

работу выходного вала. Наиболее широкое применение в современном двигателестроении получил кривошипно-ползунный механизм [3, 4].

Любой современный поршневой двигатель по экологическим и экономическим критериям можно считать однорежимным: минимум расхода топлива при допустимом качестве его сгорания обеспечивается в узком диапазоне частот вращения выходного вала; сложные системы смесеобразования, газораспределения, воспламенения рабочей смеси и нейтрализации выхлопных газов создаются для компенсации этого недостатка.

Ограничение возможности регулирования крутящего момента на выходном валу в широком диапазоне частот его вращения определяет необходимость создания силовой установки транспортного средства, в котором вал двигателя связан с коробкой передач или вариатором. Нулевая величина эффективного плеча при максимальном давлении газов на поршень и максимальная - при существенном снижении последнего приводит к тому, что десятки процентов энергии топлива тратятся на деформацию деталей и подшипников, без передачи её на выходной вал.

Увеличение числа цилиндров двигателя, преподносимое как техническое достижение, чаще всего является вынужденной мерой борьбы с кинематической неработоспособностью кривошипно-ползунного механизма. Нагрузки поршня на цилиндр в традиционном поршневом ДВС исключить невозможно. Известно множество технических предложений, снижающих или полностью исключающих эту нагрузку, но они основаны на добавлении звеньев в традиционную кинематическую схему [1].

Эти обстоятельства определяют актуальность поискового конструирования механизмов силовых установок. Известны оригинальные двигатели С.С.Баландина, Ф.Ванкеля, Р.Сарича, А.Курочкина и многих других авторов, создавших работоспособные конструкции ДВС оригинальных схем. Математические модели механизмов различных двигателей внутреннего сгорания можно компоновать из элементарных плоских и пространственных стандартных векторных контуров (модулей), отображая звенья механизмов векторами [5]. Однако, до настоящего времени не все пространственные элементарные модули имеют отлаженное аналитическое обеспечение, что затрудняет их применение для исследования некоторых перспективных механизмов.

На основе анализа кинематического и динамического совершенства современных ДВС бы-

ли сформированы некоторые подходы к совершенствованию энергоустановок [1]:

1. Достижение более благоприятных условий для организации термодинамического процесса.

2. Повышение экономических и экологических характеристик.

3. Достижение возможности регулирования крутящего момента в широком диапазоне частот вращения выходного вала.

4. Минимизация веса и габаритов.

При поиске перспективных схем механизмов необходимо учитывать требования массового производства и перспективные технологии, а также традиционное отношение к многосвязности кинематических схем основных механизмов двигателей.

На протяжении многих лет продолжается поиск различных механизмов машин объёмного вытеснения. Наиболее полно многообразие направлений этих поисков отображает раздел Р2 "Международной классификации изобретений", в частности, следующие его подразделы:

FO1 B 11/00 - Поршневые машины или двигатели без вращающегося вала, например, свободнопоршневые.

FO1 C - роторные машины или двигатели, машины или двигатели с колебательным движением рабочих органов.

FO1 C 9/00 - Машины или двигатели с качающимися рабочими органами.

FO2B - Поршневые двигатели внутреннего сгорания, двигатели внутреннего сгорания вообще.

FO2B 53/00 - Роторные двигатели внутреннего сгорания или двигатели с качающимися рабочими органами.

FO2B 55/00 - Вращающие или качающие рабочие органы.

Реальную конкуренцию традиционному поршневому двигателю в настоящее время составляют роторный двигатель Ванкеля [6] и аксиальные двигатели [7].

Однако, перспективными некоторые специалисты считают орбитальный двигатель Сарича [8], двигатель с малой степенью сжатия [9] и некоторые другие нетрадиционные силовые установки.

Известно множество других перспективных двигателей. Механизм двигателя С.С.Баландина [10] (рис. 1 а), ошибочно называемый "бесшатунным", при определённом уменьшении радиального габарита требует использования дополнительного согласующего механизма (рис. 1 б). В общем случае угол между осями цилиндров в таком двигателе может отличаться от прямого (рис. 1 в). Оппозитные варианты кривошипно-ползунного механизма (рис. 1 г и 1 в) также используются в двигателях, преимущественно, специального назначения.

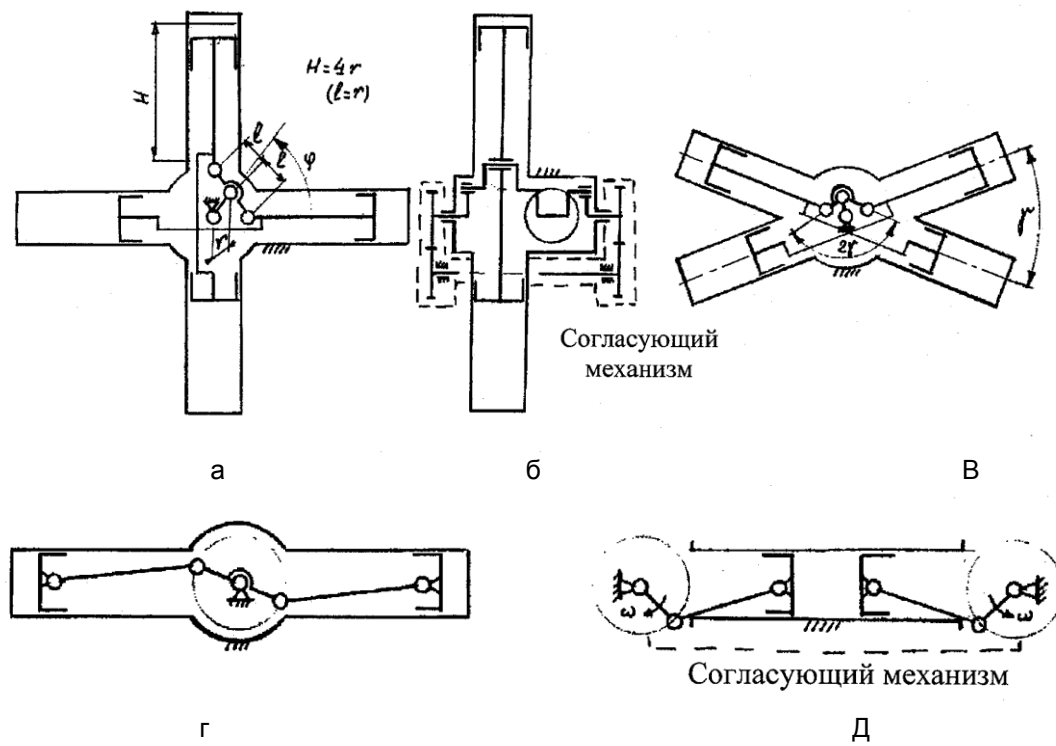


Рис. 1. Механизмы преобразования возвратно-поступательного движения поршня во вращение выходного вала

Кривошипно-кулисный механизм (рис. 2 а), практически неиспользуемый в современном автомобилестроении, широко применялся в авиационной технике на заре авиации [11].

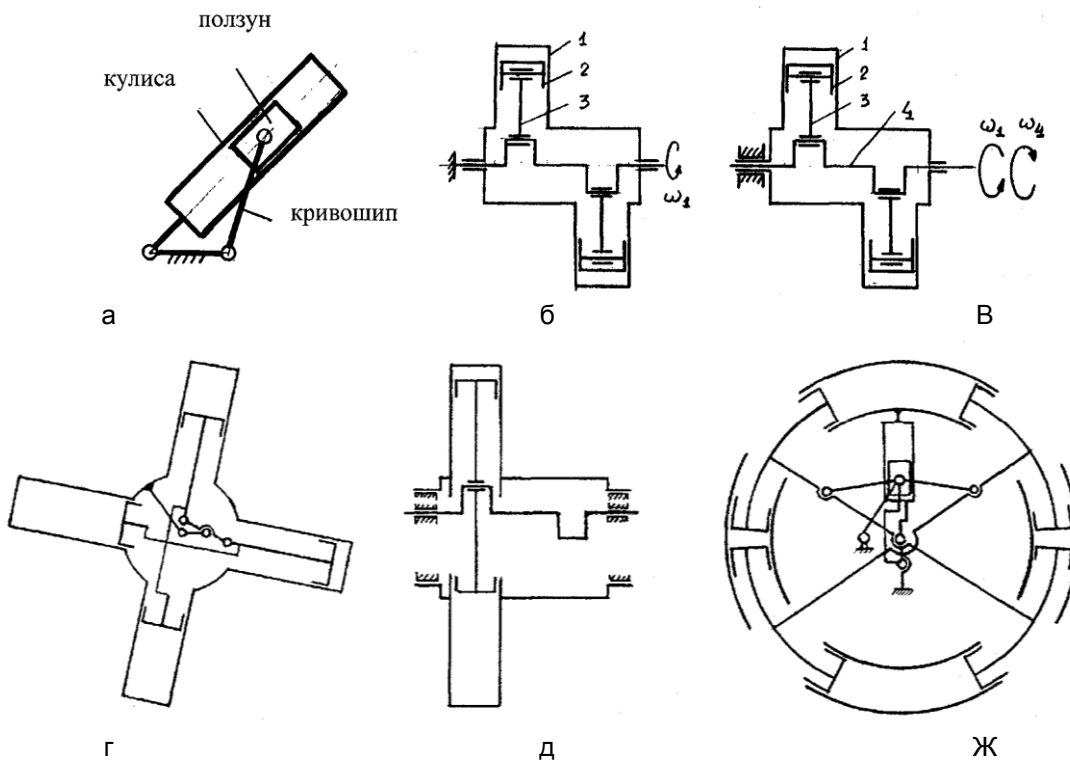


Рис. 2 Механизмы преобразования возвратно-поступательного движения поршня во вращение выходного вала

Ротативный (рис. 2 б) и реже биротативный (рис.2 в) двигатели начала XX-ого века имели хорошее воздушное охлаждение и обходились без маховика. Но одним из самых оригинальных можно считать двигатель "Burlet" [5] (рис.2 г и рис.2 д): он, действительно, бесшатунный и минимизирован по числу звеньев в отличие от двигателя С.С.Баландина (рис. 1 а и рис. 1 б) [1]. Более многозвенный ротативный двигатель "Беек" интересен своей конструкцией и полной уравновешенностью поршневой группы (рис.2 ж) [1].

В последние годы возрастает интерес специалистов к альтернативным видам топлива и нетрадиционной энергетике, связанным с поиском более экологически чистых энергоустановок транспортных средств [12, 13, 14, 15, 16].

Одним из перспективных направлений развития науки в области конструирования ДВС, является разработка свободнопоршневых энергетических установок (СПУ).

Особенности работы СПУ в первую очередь связаны с отсутствием кривошипно-ползунного механизма, преобразующего в традиционном ДВС возвратно-поступательное движение поршня в однонаправленное вращение выходного вала. Отсутствие ограничителя движения поршня (кривошипно-ползунного механизма) приводит к иному закону движения, что позволяет получить качественно новые характеристики работы такой СПУ.

СПУ можно считать наиболее простой по конструкции и хорошо приспособленной к требованиям массового производства, исходя из основного требования, предъявляемого к конструкции СПУ (простота конструкции, минимум подвижных звеньев).

Преимущества СПД.[17]:

- организация и условия протекания рабочего процесса в СПД обеспечивают высокие КПД и динамические показатели при отсутствии дымления (сажи) (преимущества свободного поршня в дизеле заключаются в оптимальном теплоподводе, отсутствии ограничений на жесткость и максимальное давление цикла, высокий механический КПД, незначительный (до 10%) провал коэффициента избытка воздуха при наборе нагрузки);
- многотопливность, возможность применения низкосортных альтернативных топлив и газов произвольного состава, включая сбросные и тощие (содержание метана более 10 – 20 % без потери мощности) с воспламенением от сжатия;
- динамическая уравновешенность, отсутствие вибраций и фундамента;
- низкие затраты при эксплуатации и ремонте;
- высокие пусковые качества при низких температурах;
- возможность отключения одного или нескольких СПД без остановки остальных;
- возможность повышения давления наддува и максимального давления сгорания;
- простота, надежность и технологичность конструкции;
- удобство компоновки в пространстве. Модульный принцип компоновки.
- удельная массовая и габаритная мощность в 4 – 9 раз выше дизелей.

Одна из самых радикальных концепций ДВС в истории – двигатель со свободным поршнем. Первые упоминания о нем в специальной литературе относятся к 1920-м годам. Представьте себе металлическую трубу с глухими концами и цилиндрический поршень, скользящий внутри нее (рис 3).

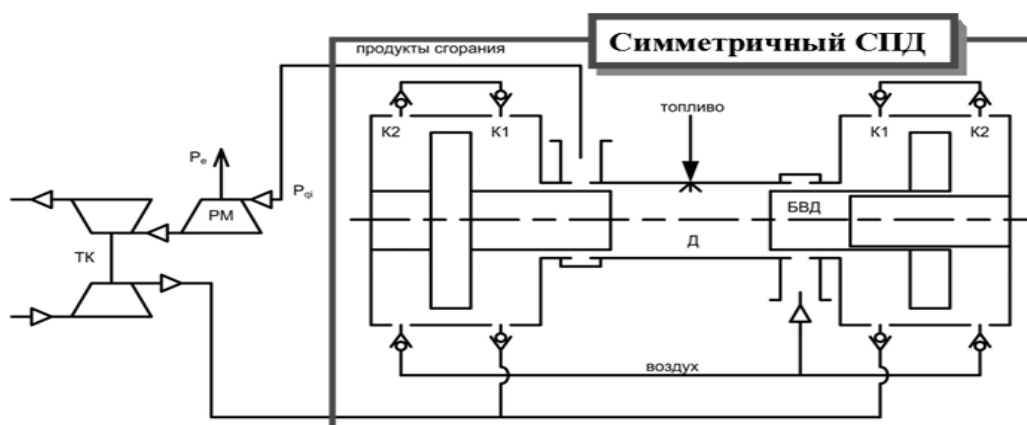


Рис. 3 Схема комбинированной энергетической установки (КЭУ) со свободнопоршневым двигателем (СПД): Д – дизель, БВД – буфер, K1, K2 – первая и вторая ступени поршневого компрессора, РМ – расширительная машина, ТК – турбокомпрессор, P_e – эффективная мощность, P_{q1} – давление в газосборнике

На каждом из концов трубы расположены инжектор для впрыска топлива, впускной и выпускной порты. В зависимости от типа топлива к ним могут добавлены свечи зажигания. И все: меньше десятка простейших деталей и лишь одна – движущаяся. Позднее появились более изощренные модели ДВС со свободным поршнем с двумя или даже четырьмя оппозитными поршнями, но это не изменило сути. Принцип работы таких моторов остался прежним – возвратно-поступательное линейное движение поршня в цилиндре между двумя камерами сгорания (рис 3). Теоретически КПД СПУ переваливает за 70%. Они могут работать на любом виде жидкого или газообразного топлива, крайне надежны и великолепно сбалансированы. Кроме того, очевидны их легкость, компактность и простота в производстве.

Эта задача долго оставалась неразрешимой, хотя попытки предпринимались регулярно. Последними о нее обломали зубы инженеры General Motors в 1960-х годах в процессе разработки компрессора для экспериментального газотурбинного автомобиля. Действующие образцы судовых насосов на основе СПУ в начале 1980-х были изготовлены французской компанией Sigma и британской Alan Muntz, но в серию они не пошли [2].

Большие перспективы применения имеют СПУ, изобретенные профессором Билом из университета штата Огайо. Эти двигатели самозапускающиеся, с необычными характеристиками, отличающимися от характеристик одноцилиндровых двигателей с кривошипно-шатунным механизмом; кроме того, отдельные варианты двигателей могут быть изготовлены без всяких уплотнений для газа. В последнем случае заполнение рабочим телом под давлением и герметизацию двигателей можно производить при их изготовлении, что обеспечит относительно высокую удельную мощность и предотвратит возможное загрязнение движущихся узлов от внешней пыли. В таком исполнении двигатели могут быть применимы для тех случаев, когда их обслуживание является проблемой, т. е. в малоразвитых в техническом отношении странах, в военных целях и для бытовых нужд [18].

Так для расширения технических возможностей разрабатываются гибридные установки разных типов, в частности, на основе свободнопоршневых двигателей [19, 20] имеющих в своём составе лишь одно подвижное звено - поршень.

Поэтому особый интерес, как объект исследования, представляют СПУ, имеющие следующие принципиальные достоинства:

- единственность кинематической пары без нагрузок поршня на цилиндр;

- возможность изменения амплитуды относительных перемещений поршня, а следовательно и степени сжатия [21].

Простейшая СПУ, варианты структурных схем которой показаны на рис. 4, имеет корпус и поршень - звено, установленное с возможностью свободного перемещения в корпусе. В общем случае, два звена корпус и поршень могут образовывать поступательную или вращательную кинематическую пару, а неподвижным может быть выполнено любое из них.

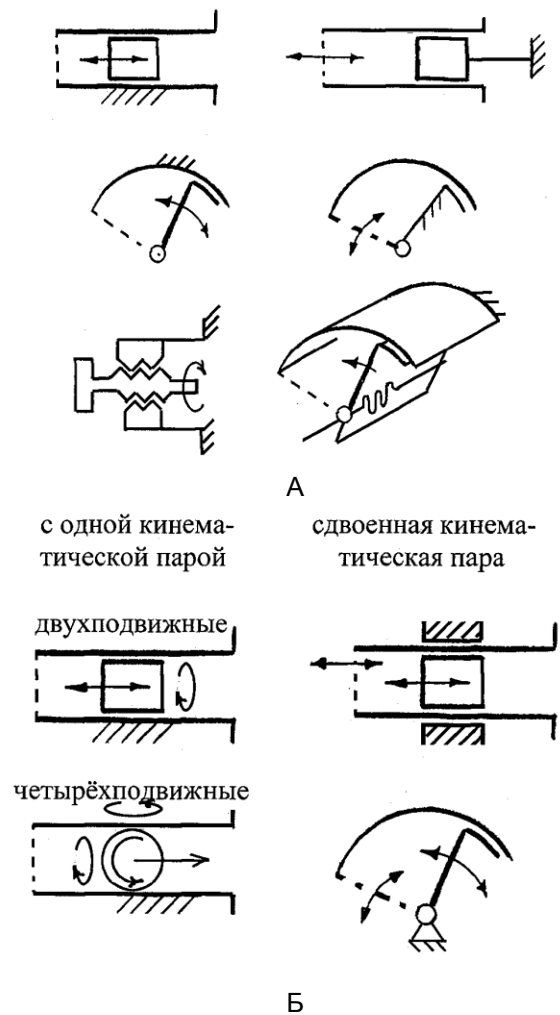


Рис. 4. Варианты структурных схем СПУ а - простейшие; б - сложные

Двухходовой линейный ДВС (двигатель Штельцера) [22] экспонировался в 1990 г. на Ганновской выставке, отличается предельной простотой и отсутствием конструктивных излишеств. Из подвижных частей в нём лишь один поршневой блок, свободноплавающий в цилиндрических расточках корпуса. Поршневой блок имеет 3 поршня - 2 рабочих на концах блока и компрессионный в средней части (рис. 5).

Преимущества двигателя Штельцера заключаются в том, что рабочий процесс происходит при движении блока поршней в обе стороны, при этом достигается высокий коэффициент полезного действия. С увеличением скорости движения поршней увеличивается степень сжатия, и рабочая характеристика мощности непрерывно растёт с увеличением частоты ходов до 30000 в минуту, и лишь после этого она начинает понижаться из-за задержки прохода воздуха через воздухоподающие каналы. Поскольку двигатель не имеет шатунов и поршневых втулок, в нём не возникают боковые усилия и уменьшаются трение и нагревание.

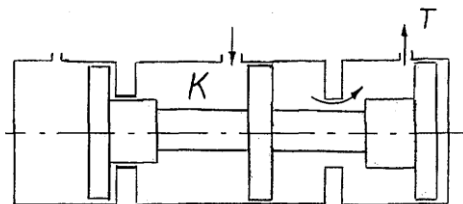


Рис. 5 Двигатель Штельцера

Дизель-молоты являются наиболее распространённым типом сваепогружающего оборудования [23].

Компрессор по патенту РФ №2084662 (рис. 6) может быть использован для компримирования газа, при интенсификации добычи нефти и газа и т.д. Технический результат экономия дефицитного дизельного топлива путем замены его на природный или нефтяной газ, интенсификация добычи газообразного топлива, улучшение экологической чистоты окружающей среды за счет снижения токсичности отработавших газов, увеличение ресурса работы. Сущность изобретения: при подаче газа под давлением происходит наполнение цилиндра через окна из ресивера. При подходе поршней к верхней мёртвой точке на свечу подается напряжение и осуществляется воспламенение газозоудной смеси в камере сгорания. Рабочее тело сжимается в компрессорных полостях и буфере.

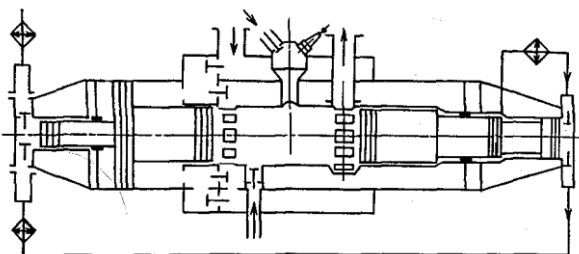


Рис. 6. Свободнопоршневого компрессор

СПУ часто используют в качестве генераторов газа. В отличие от обычных двигателей внутрен-

него сгорания свободнопоршневой генератор газа не отдаёт энергию потребителю. Эффективную работу совершает газовая турбина [6].

Одно из перспективных направлений применения СПУ объёмного вытеснения - в микрокриогенных системах на базе криогенной машины Сплит-Стирлинга с линейным приводом [24]. В качестве двигателя с циклом Стирлинга может быть использована и СПУ Beale.

Характеристики таких машин отличаются от двигателей с кривошипно-ползунным механизмом. Установки полностью герметичны, что позволяет использовать практически любые рабочие тела [25].

Свободнопоршневой электрогенератор фирмы "Monthelec" [20] представляет собой СПУ с магнитоэлектрической системой (рис.7).

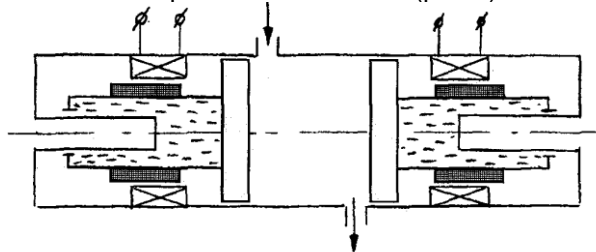


Рис. 7 Свободнопоршневой электрогенератор "Monthelec"

Поршень такой установки совмещён с постоянным магнитом, а корпус с индукционной катушкой. В результате взаимодействия магнита-поршня с обмоткой катушки наводится электродвижущая сила (ЭДС) индукции [26]. Такая конструкция установки позволяет, наряду с сохранением преимуществ линейных двигателей, обеспечить необходимый съём мощности в виде электроэнергии, что в свою очередь определяет качественно новые конструкторские решения.

Выводы:

1. Разработка и совершенствование СПУ, является важной научной задачей, решение которой позволит существенно повысить качественные требования к проектированию различных типов ДВС и определит перспективные направления повышения КПД, как в СПУ, так и в других типах ДВС.

2. СПУ развиваются в основном по пути совершенствования частных конструктивных решений, не имея достаточной степени научного обоснования структурных и принципиальных схем решений.

3. На данный момент не решена проблема снятия мощности с СПУ, механически представляющего собой замкнутую систему, и контроля работы установки при частоте до 20000 циклов в минуту.

4. СПУ можно считать наиболее простой по конструкции и хорошо приспособленной к требованиям массового производства среди всех используемых ДВС.

Литература.

1. Герасимов Д.В. Анализ и синтез свободно-поршневых механизмов энергоустановок летательных аппаратов / Д.В.Герасимов. – Самара, 2001. – 122 с.
2. Электронный ресурс / <http://www.popmech.ru/article/6836-porshen-na-svobode/>
3. Гавриленко В.А. Теория механизмов / В.А.Гавриленко, С.Б.Минус, А.К.Мусатов и др. – М.: Высш. школа., 1973.
4. Баранов Г.Г Курс теории механизмов и машин / Г.Г.Баранов. – М.: Машиностроение, 1967.
5. Семёнов Б.П. Модульное моделирование механизмов. / Б.П.Семёнов, А.Н.Тихонов, Б.Б.Косенок – Самара: СГАУ, 1996.
6. Орлин А.С. Теория рабочих процессов поршневых и комбинированных двигателей / А.С.Орлин. – М.: Машиностроение, 1971. 398с.
7. Велиев В.Д. Система пневматического пуска бескомпрессорного свободно-поршневого генератора газа / В.Д.Велиев // Двигатели внутреннего сгорания. М., 1973, вьш.80, с 70-75.
8. Крайнев А.Ф. Механика машин / А.Ф.Крайнев. – М.: Машиностроение, 1999.
9. Measurements were made by M.King and O.Nichelson at Eyring, Inc., with a HP 3577A network analyzer on 3 inch diameter coils with 43 turns each of number 20 wire.
10. Баландин С.С Бесшатунные двигатели внутреннего сгорания / С.С.Баландин. – М.: Машиностроение, 1972. – 176 с.
11. Кожевников С.Н. Механизмы / С.Н.Кожевников, Я.И.Есипенко, Я.М.Раскин. – М.: Машиностроение, 1965. – 1057 с.
12. Балдин С. Воздухоплавательные двигатели / С.Балдин – С.-Петербург: Тип. Ус-манова, 1910.
13. Гомелаури В.И. Опыт разработки и применения тепло-насосных установок / В.И.Гомелаури, О.Ш.Везиришвили // Теплоэнергетика, 1978, №4.
14. Зысин В.А. Комбинированные парогазовые установки и циклы / В.А.Зысин. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962.
15. Кривоногов Б.М. Повышение эффективности сжигания газа и охрана окружающей среды. Л.: Недра, 1986. 280 с.
16. Кудрявый В.В. Электроэнергетика: наука, экономия, энергосбережение / В.В.Кудрявый // Энергетик, 1995. № 4.
17. Электронный ресурс / <http://equip-projects.ru/21/dvig.shtml>
18. Электронный ресурс / <http://msd.com.ua/mashiny-rabotayushhie-po-ciklu-stirlinga/svobodnoporshnevye-dvigateli-bila/>
19. Ермаков А.И. Инерционные двигатель комбинированный, электродвигатель и преобразователь / А.И.Ермаков F02B71/04 № 98122901/06, заявлен 1998.12.18.
20. Freikolbenmotor "Rectilineaire" / Autotechnik №43, 1980.
21. ДВС с переменной степенью сжатия. Французский патент. F02d17/00, F02d22/00, №2102430, заявлен 3.09.70.
22. Двухходовой двигатель внутреннего сгорания имеет всего лишь одну подвижную деталь // Изобретатель и рационализатор. 1990. №3. с.44.
23. Авдеев К.А. Разработка математической модели, исследование функционирования и построение методики проектировочных расчётов быстроходного дизель-молота / К.А.Авдеев. – Автореферат. Тула, ТГУ, 2000. 20с.
24. Model of TRTC Stirling engine with adiabatic working spase// Renflor D.A.,Count M.IITrans. ASME. J.Eng. Gas Turbines and Power. 1988. 110, № 4. 658 - 663 pp.
25. Уокер Г. Двигатели Стирлинга / Сокр. пер. с англ. Б.В.Сутугина и Н.В.Сутугина, М.: Машиностроение, 1985, 408 с,
26. Харитонов С.А. Принципы построения и расчета систем генерирования остоянного и переменного тока для ветроэнергетических установок и подвижных автономных объектов / С.А.Харитонов // Науч. техн. конференция с междунар. участием "Электротехн, систем трансп, средств и их роботизир. пр-в", Суздаль, 1995.

Анотація

Вільнопоршневі конструкції - один з перспективних напрямів вдосконалення силових установок транспортних засобів

М.Шуляк

Проведено аналіз можливих напрямів вдосконалення двигунів внутрішнього згорання, розглянуті позитивні та негативні аспекти застосування вільнопоршневих установок, виявлені причини, що перешкоджають масовому використанню даного типу механізмів та запропоновано шлях їх розвитку.

Ключові слова: *двигун внутрішнього згорання, кривошипно-шатунний механізм, циліндропоршнева група, гібридні установок, вільнопоршневі енергетичні установок.*

Abstract**Free-piston constructions - one of the most promising ways of improving power units of vehicles****M.Shuliak**

The analysis of possible ways of improving the internal combustion engines is carried out, the positive and negative aspects of free-piston installation usage are reviewed, the causes hindering the mass use of this type of mechanisms are revealed and the way of their development is presented in this article.

Keywords: *internal combustion engine, crank mechanism, cylinder-piston group, hybrid plants, free-piston power units.*

Представлено: Е.Е.Александров / Presented by: E.Aleksandrov

Рецензент: Сандомирский / Reviewer: Sandomirskiy

Подано до редакції / Received: 16.09.2013