

61: 02 - 5 / 1434 - X

Министерство образования Российской Федерации
Самарский государственный аэрокосмический университет
им. академика С.П. Королёва

ГЕРАСИМОВ ДЕНИС ВИКТОРОВИЧ



**Анализ и синтез свободнопоршневых
механизмов энергоустановок
летательных аппаратов**

05.07.05

Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки
летательных аппаратов

05.02.18

Теория механизмов и машин

Д и с с е р т а ц и я

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

кандидат технических наук Семёнов Борис Петрович

Самара - 2001

СОДЕРЖАНИЕ

ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ	4
ВВЕДЕНИЕ	5
1. АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	8
2. ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУР СВОБОДНОПОРШНЕВЫХ МЕХАНИЗМОВ И РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ВЕКТОРНЫХ МОДУЛЕЙ	25
2.1. Структурный анализ свободнопоршневых механизмов	25
2.1.1. Структурно-конструктивные схемы механизмов	25
2.1.2. Совмещённые подвижные соединения звеньев	32
2.1.2.1. Условия образования совмещённых подвижных соединений	32
2.1.2.2. Совмещённые осевые подвижные соединения	36
2.1.2.3. Совмещённые радиальные подвижные соединения	44
2.1.2.4. Совмещённые смешанные подвижные соединения	46
2.1.3. Обращение совмещённого подвижного соединения в свободнопоршневые механизмы	48
2.1.3.1. Выбор стойки	48
2.1.3.2. Введение дополнительных связей звеньев	48
2.2. Развитие теории векторных модулей	50
2.2.1. Анализ применимости элементарных модулей в моделях свободнопоршневых механизмов	50
2.2.2. Применение метода обращения для модулей Пр6 и Пр14-17	55
2.2.3. Применение метода отображения на плоскости	59

3. РАЗРАБОТКА ОСНОВ МЕТОДИКИ КОМПОЗИЦИИ СВОБОДНОПОРШНЕВЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК	62
3.1. Обобщённое описание свободнопоршневой энергоустановки	62
3.2. Обобщённое описание свободнопоршневого механизма	65
3.3. Аналитическое описание межконтурных связей	69
3.4. Выбор динамической модели свободнопоршневой энергоустановки	71
4. КОМПОЗИЦИЯ СВОБОДНОПОРШНЕВЫХ ЭНЕРГОБЛОКОВ	75
4.1. Особенности работы свободнопоршневого ДВС	75
4.2. Особенность работы линейного электрогенератора	85
4.3. Поискые возможности метода композиции	92
4.4. Требования к микропроцессорной системе управления	99
4.5. Поиск принципиальных схем линейных ДВС с однонаправленным вращением выходного вала	101
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	109
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	110
ПРИЛОЖЕНИЯ	117

ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

ВМТ - верхняя мёртвая точка

ДВС - двигатель внутреннего сгорания

КП - кинематическая пара

НМТ - нижняя мёртвая точка

СПМ - свободнопоршневой механизм

СПГЭ - свободнопоршневой генератор электроэнергии

ЭДС - электродвижущая сила

ВВЕДЕНИЕ

Современные требования экологии и экономичности [7, 14, 16, 28, 34, 39, 41, 58, 87] определяют практическую ценность создания совершенных силовых установок летательных аппаратов. Малая авиация широко использует поршневые двигатели традиционных схем и наряду с этим осваивает роторные и аксиально-поршневые двигатели. Связано это в первую очередь с недостатками кривошипно-ползунного механизма, преобразующего возвратно-поступательное движение поршня во вращение выходного вала, а именно:

- невозможность автоматического изменения степени сжатия без усложнения кинематической схемы, что приводит к недоиспользованию энергии надпоршневого пространства при повышенных оборотах коленчатого вала;
- наличие нормальной нагрузки поршня на цилиндр, что ведёт к потерям мощности на трение.

Эти обстоятельства определяют *актуальность* развития методов совершенствования механизмов традиционных схем, а также поиска перспективных механизмов энергоустановок при всесторонней оценке их кинематических и динамических характеристик на этапе эскизного проектирования.

Особый интерес как объект исследования представляют свободнопоршневые двигатели, имеющие по сравнению с традиционными силовыми установками следующие принципиальные достоинства:

- единственность кинематической пары (поршень-цилиндр) без нагрузок поршня на цилиндр;
- возможность изменения амплитуды относительных перемещений поршня, а следовательно и степени сжатия.

Цель исследования - развитие методов анализа и синтеза механизмов свободнопоршневых энергоустановок летательных аппаратов, создание аналитического и методического обеспечения процесса прогнозирования характеристик их вариантов на этапе предэскизного проектирования.

Научная новизна. Определены структурно-конструктивные формулы осевых, радиальных и смешанных совмещённых подвижных соединений, представляющих интерес для синтеза свободнопоршневых механизмов.

Получены прямые аналитические решения задачи о функциях обращаемых элементарных пространственных векторных модулей.

На структурном уровне предложено обобщённое описание свободнопоршневых машин.

Созданы основы методики композиции свободнопоршневых энергоустановок и показана практическая применимость предложенной методики при поисковом проектировании.

Практическая ценность.

Предложена методика, позволяющая проводить прогнозирование кинематических и динамических характеристик вариантов проектируемых свободнопоршневых энергоустановок на этапе выбора принципиальной схемы. Полученные (на основе обобщённого описания) кинематические и динамические модели обеспечивают значительное снижение трудоемкости и затрат при исследовании и проектировании свободнопоршневых энергоустановок.

Результаты работы использованы при создании макетов энергетической установки на базе свободнопоршневого двигателя и механизма преобразования возвратно-поступательного движения во вращение выходного вала и могут быть рекомендованы для практического внедрения.

Результаты исследований использованы в учебном процессе на кафедре “Основы конструирования машин” Самарского государственного аэрокосмического университета.

Публикация и апробация работы.

Результаты диссертационной работы опубликованы в сборниках статей, апробированы на всероссийских и международных научно-технических конференциях, выставках, поданы заявки на выдачу патента:

1. Герасимов Д.В. Исследование особенностей проектирования свободнопоршневого электрогенератора / Известия Самарского научного центра РАН. Самара: СНЦ РАН, 2000. Т2. №1.
2. Семёнов Б.П., Герасимов Д.В., Мануйлов П.В. Создание обобщённой структурной модели свободнопоршневого генератора / Вестник СГАУ. Самара: СГАУ, 2000. Вып.4. Ч.2.
3. Семёнов Б.П., Герасимов Д.В. Выбор основных направлений исследования свободнопоршневого электрогенератора / Вестник СГАУ. Самара: СГАУ, 2000. Вып.4. Ч.1.
4. Семёнов Б.П., Герасимов Д.В. Примитивизм как направление композиции механизмов двигателя / Motauto99 Proceeding, Internal Combustion Engines, Plovdiv 13-15 October 1999.
5. Семёнов Б.П., Герасимов Д.В. Опыт композиции линейных ДВС / Тезисы Международного научного симпозиума. Рига: РАУ 1996.
6. Семёнов Б.П., Герасимов Д.В. Композиция перспективных автомобильных силовых агрегатов / Тезисы докладов международной научной конференции. Тольятти: АвтоВАЗ, 1998.
7. Семёнов Б.П., Герасимов Д.В. Математическое моделирование двигателей внутреннего сгорания / Математическое моделирование, 13-16 июня. Самара 2001.
8. Семёнов Б.П., Герасимов Д.В., Воеводин А.В. Развитие аналитической теории векторных модулей / Обзорение прикладной и промышленной математики. Том 8, Выпуск 1. Москва 2001.

1. АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Актуальность исследования определяется практикой проектирования энергетических установок, требующей постоянного развития методов исследования и совершенствования механизмов традиционных схем, а также поиска перспективных механизмов при всесторонней оценке их кинематического и динамического совершенства на различных этапах проектирования.

Современные поршневые силовые агрегаты транспортных средств и летательных аппаратов (в частности, двигатели внутреннего сгорания) представляют собой сложные системы механизмов, обеспечивающих не только преобразование возвратно-поступательного движения поршня во вращательное движение выходного вала, но и процесс смесеобразования, воспламенения топливовоздушной смеси, охлаждение цилиндров и т.д.

Основной механизм машины объёмного вытеснения двигателя внутреннего сгорания (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 [6, 11].

Имеется объективная причина поиска принципиально новых механизмов двигателей силовых установок. Кривошипно-ползунный механизм - источник многих принципиальных недостатков двигателя внутреннего сгорания:

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.

Быстротекущие процессы расширения-сжатия определяют политропный процесс преобразования тепловой энергии, существенно отличающийся от идеального. Повышение частоты вращения и степени сжатия, как способ увеличения литровой мощности двигателя, приводит к снижению его термодинамического совершенства.

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 летательного аппарата (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. Установка на летательный аппарат двух и более двигателей определяется прежде всего стремлением повысить безопасность полёта в случае отказа одного из них, а не желанием повысить общую мощность энергоустановки.

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. Однако, существует негласный запрет на число подвижных звеньев кинематической схемы основного ме-

ханизма ДВС при неограниченной свободе усложнения всех прочих механических систем силового агрегата летательного аппарата.

Эти обстоятельства определяют актуальность поискового конструирования механизмов силовых установок. Известны оригинальные двигатели "Burlet" и 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 [68]. Однако, до настоящего времени не все пространственные элементарные модули имеют отлаженное аналитическое обеспечение, что затрудняет их применение для исследования некоторых перспективных механизмов авиационных двигателей.

На основе анализа кинематического и динамического совершенства современных ДВС были сформированы некоторые подходы к совершенствованию энергоустановок:

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 многозвенности кинематических схем основных механизмов двигателей.

На протяжении многих лет продолжается поиск различных механизмов машин объёмного вытеснения. Наиболее полно многообразие направлений этих поисков отображает раздел F2 "Международной классификации изобретений", в частности, следующие его подразделы:

FO1B 11/00 - Поршневые машины или двигатели без вращающегося вала, например, свободнопоршневые.

FO1C - роторные машины или двигатели, машины или двигатели с колебательным движением рабочих органов.

FO1C 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 [57] и аксиальные двигатели [29]. Однако, перспективными некоторые специалисты считают орбитальный двигатель Сарича [36], двигатель с малой степенью сжатия [86] и некоторые другие нетрадиционные силовые установки. Известно множество других перспективных двигателей.

Механизм двигателя С.С. Баландина [4] (рис.1.1ж), ошибочно называемый "бесшатунным", при определённом уменьшении радиального габарита требует использования дополнительного согласующего механизма (рис.1.1з). В общем случае угол между осями цилиндров в таком двигателе может отличаться от прямого (рис.1.1и).

Оппозитные варианты кривошипно-ползунного механизма (рис.1.1к и 1.1л) также используются в двигателях, преимущественно, специального назначения.

Кривошипно-кулисный механизм (рис.1.2а), практически неиспользуемый в современном автомобилестроении, широко применялся в авиационной технике на заре авиации [31].

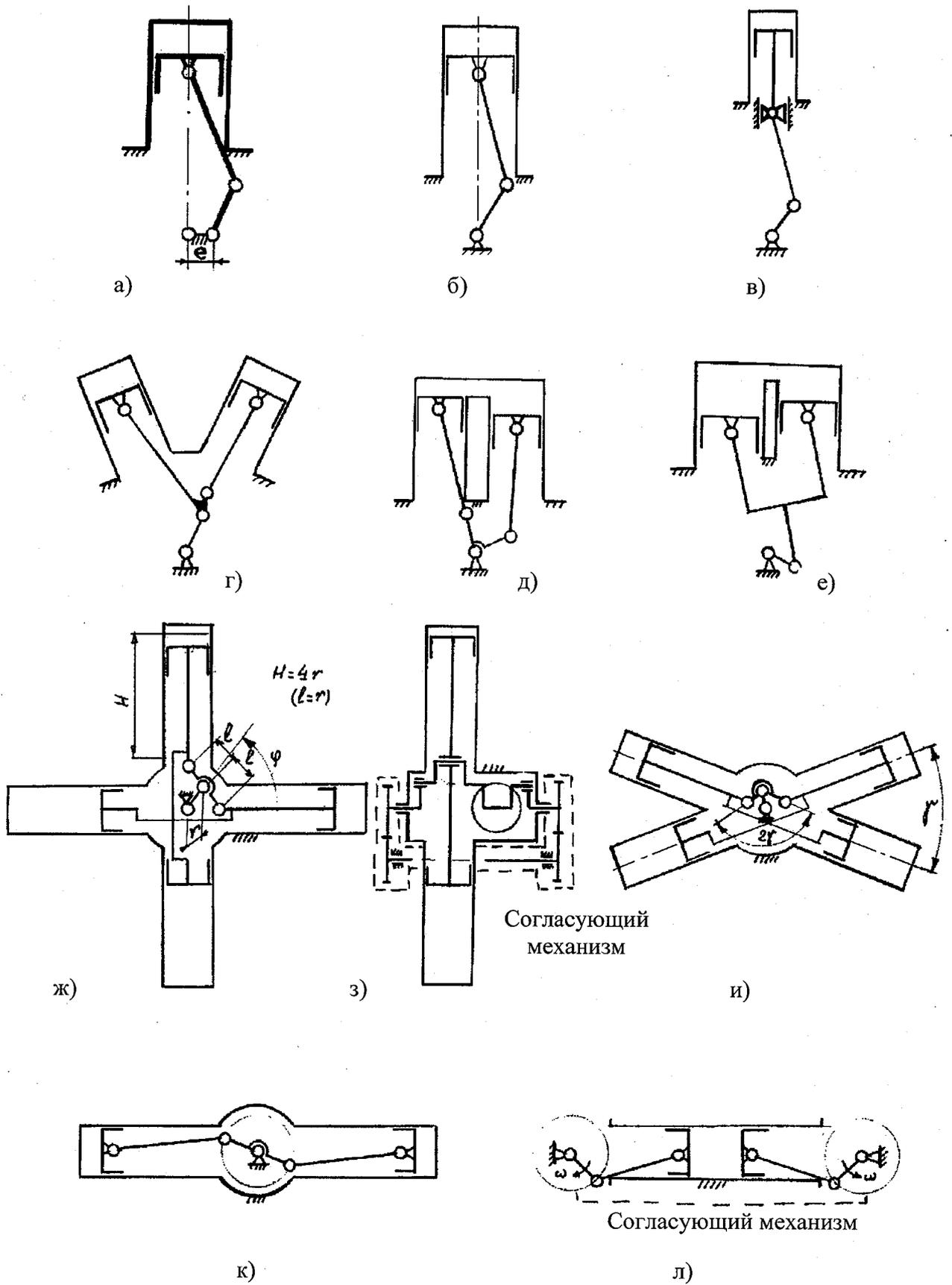


Рис.1.1. Механизмы преобразования возвратно-поступательного движения поршня во вращение выходного вала

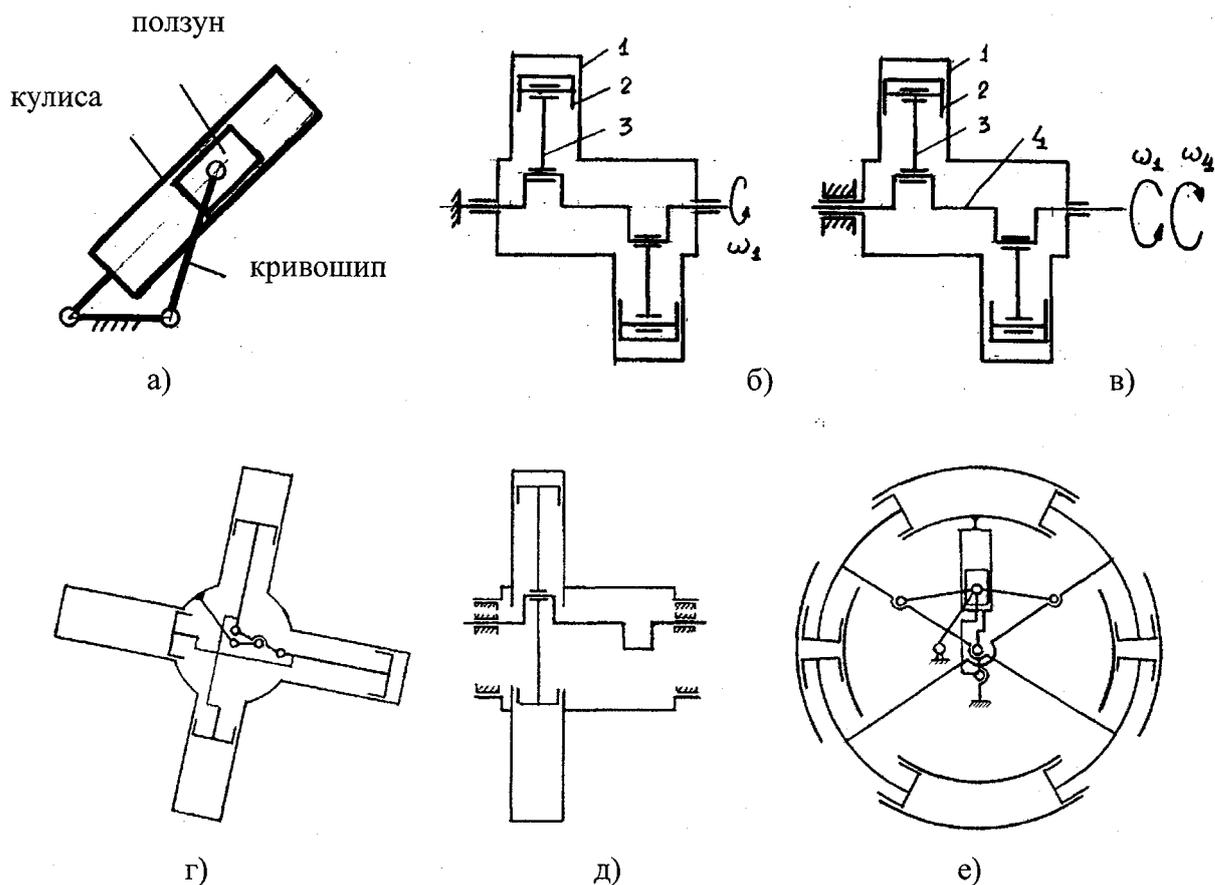


Рис.1.2. Механизмы преобразования возвратно-поступательного движения поршня во вращение выходного вала

Ротативный (рис.1.2б) и реже биротативный (рис.1.2в) двигатели [5] на лёгких самолётах начала XX-ого века имели хорошее воздушное охлаждение и обходились без маховика. Но одним из самых оригинальных можно считать двигатель "Burlet" [5] (рис.1.2г и рис.1.2д): он, действительно, бесшатунный и минимизирован по числу звеньев в отличие от двигателя С.С. Баландина (рис.1.2ж и рис.1.2з).

Более многозвенный ротативный двигатель "Beck" [5] интересен своей конструкцией и полной уравновешенностью поршневой группы (рис.1.2е).

Известно множество различных по конструкции роторных двигателей, создаваемых на основе шиберных (пластинчатых) механизмов (рис.1.3а и рис.1.3б), объёмной машины Рутса [19] (рис.1.3в) и другие, которые получили значительно меньшее практическое применение, чем роторно-поршневой двигатель Ф. Ванкеля (рис.1.3г, д). Ротор двигателя Ванкеля выполнен в виде трёхгранной призмы, вершины которой непрерывно контактируют с внутренней

поверхностью цилиндра, образуя полости изменяемого поперечного сечения. Принципиально более простыми можно считать роторные механизмы "однотактных" ДВС (рис.1.3г), не получившие широкого практического применения.

Основной проблемой для большинства роторно-поршневых двигателей является проблема создания надёжного и долговечного радиального уплотнения ротора с цилиндром, имеющего в поперечном сечении чаще всего точечный контакт [12].

Принципиально иной подход к созданию радиального уплотнения подвижного звена с цилиндром выбран Р. Саричем, предложивший "орбитальный" двигатель. Рабочее звено - орбитон - совершает плоское движение, контактируя по плоскостям с пластинами, установленными с возможностью линейного перемещения в пазах корпуса (рис.1.4а). Вредное влияние динамических нагрузок пластин на орбитон можно уменьшить за счёт конструктивных модификаций (рис.1.4б) исходного механизма.

Весьма оригинально решена проблема радиального уплотнения "по плоскостям" в машине объёмного вытеснения А. Курочкина (рис.1.5): в прорезях ротора свободно перемещаются пластины, контактирующие с двумя плоскостями внутренней поверхности вращающегося корпуса.

Современные технологии и материалы могут реанимировать забытые технические решения. Например, известно успешное практическое применение кулачковых механизмов в современных авиационных двигателях DYNA-CAM [29, 84] (рис.1.6).

В последние годы возрастает интерес специалистов к альтернативным видам топлива и нетрадиционной энергетике, связанный с поиском более экологически чистых энергоустановок транспортных средств и летательных аппаратов [5, 13, 26, 37, 39].

Так для расширения технических возможностей электромобилей разрабатываются гибридные установки разных типов, в частности, на основе свободнопоршневых двигателей [23, 85], имеющих в своём составе лишь одно подвижное звено - поршень.

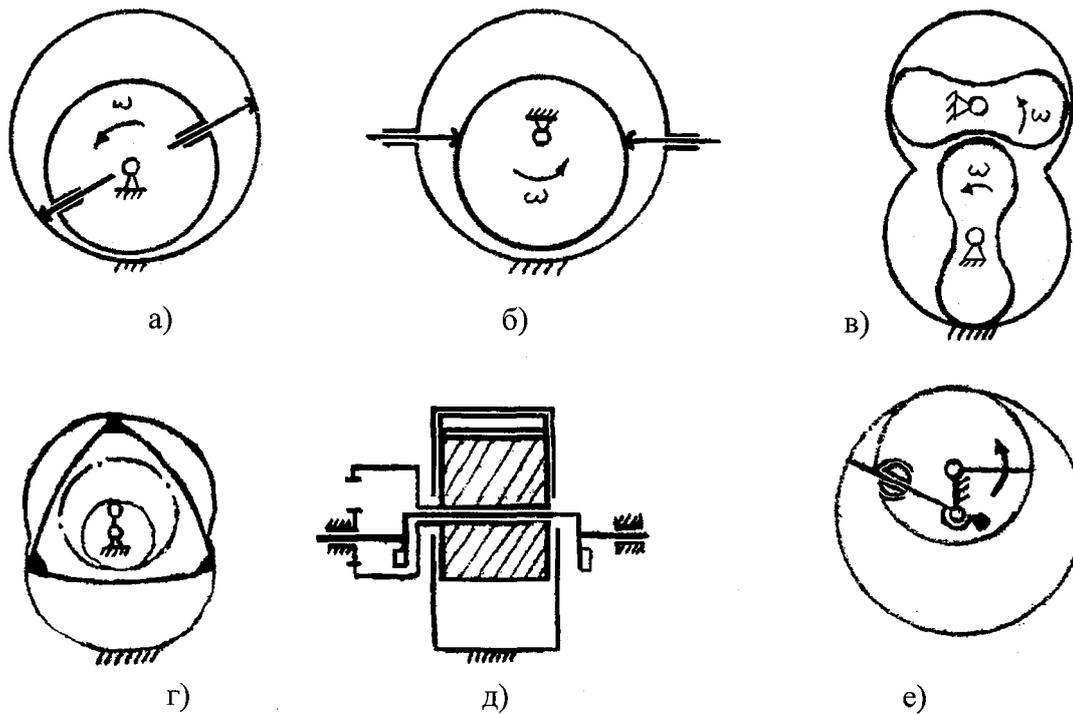


Рис.1.3. Механизмы роторных двигателей

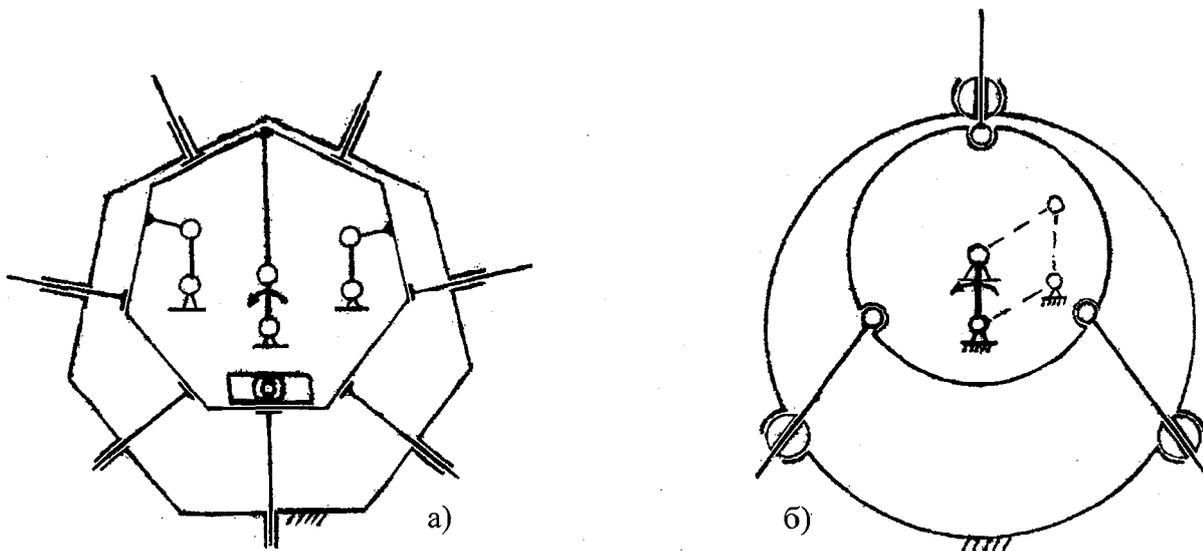


Рис.1.4. Механизмы орбитальных двигателей

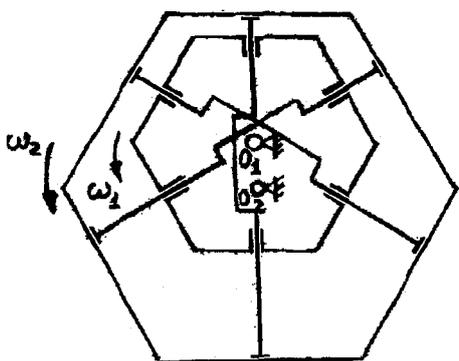


Рис.1.5. Механизм А. Курочкина

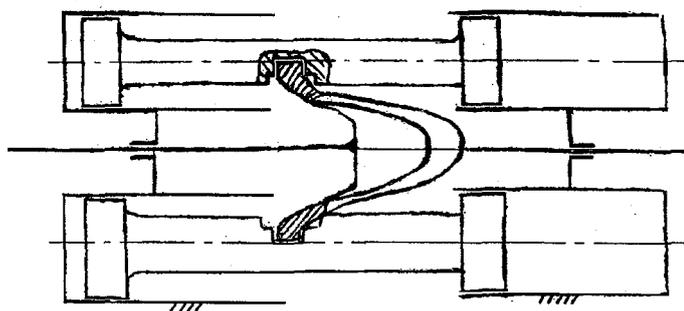


Рис.1.6. Механизм авиационного двигателя DYNA-CAM

Поэтому особый интерес, как объект исследования, представляют *свободнопоршневые механизмы*, имеющие следующие принципиальные достоинства:

- единственность кинематической пары без нагрузок поршня на цилиндр;
- возможность изменения амплитуды относительных перемещений поршня, а следовательно и степени сжатия [15].

Авиация и космическая техника используют свободнопоршневые механизмы в пневмо- и гидроприводах, амортизаторах, клапанных устройствах и силовых установках различного назначения [79].

Обобщённый анализ свободнопоршневых механизмов требует уточнения некоторых терминов.

Простейший свободнопоршневой механизм, варианты структурных схем которого показаны на рис.1.7, 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.

Свободнопоршневой механизм (СПМ) - механизм с одной кинематической парой, образуемой поршнем и корпусом, и возвратным относительным перемещением его звеньев.

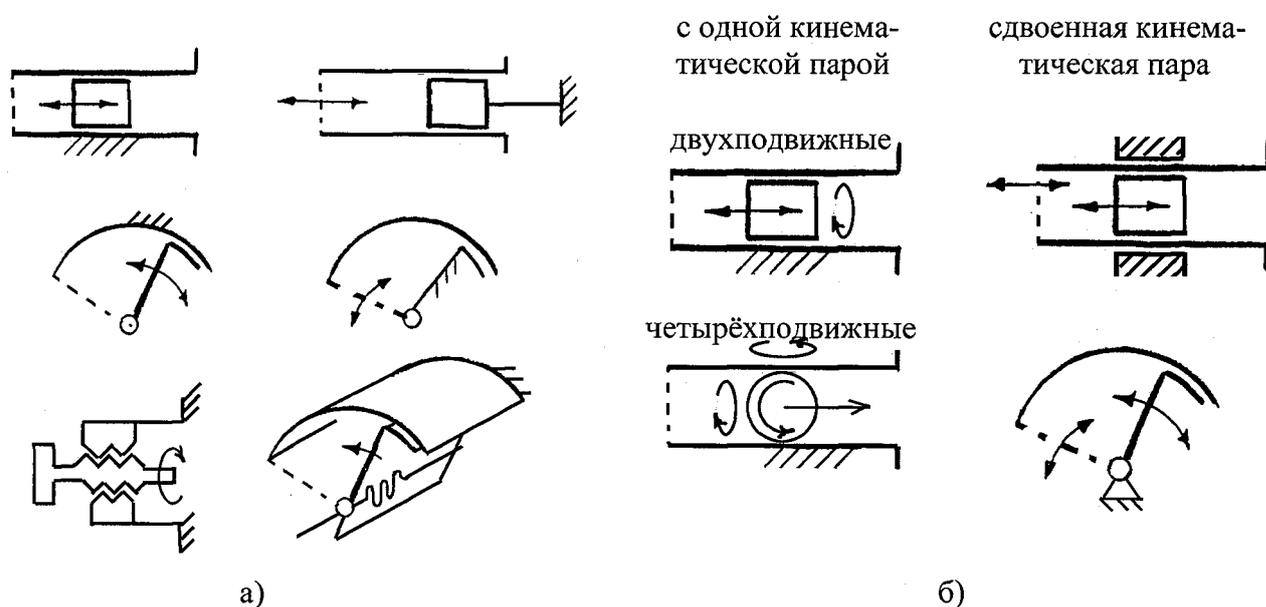


Рис.1.7. Варианты структурных схем свободнопоршневых механизмов
а - простейшие; б - сложные

Многообразие областей практического применения СПМ частично иллюстрирует рис.1.8.

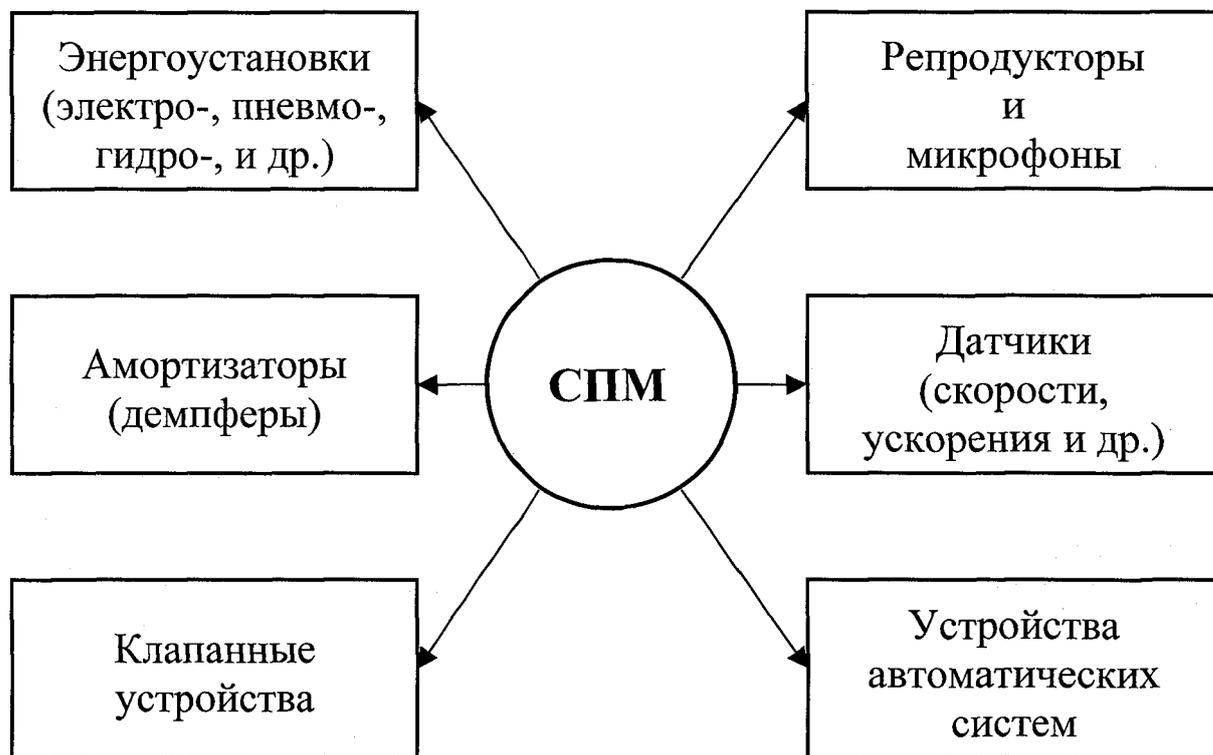


Рис.1.8. Области применения свободнопоршневых механизмов

Свободнопоршневые механизмы широко применяются в клапанных устройствах там, где предъявляются повышенные требования к динамической нагруженности конструкций, герметичности и сроку службы механизма. Примеры конструктивных схем клапанов прямого действия [79] приведены на рис.1.9.

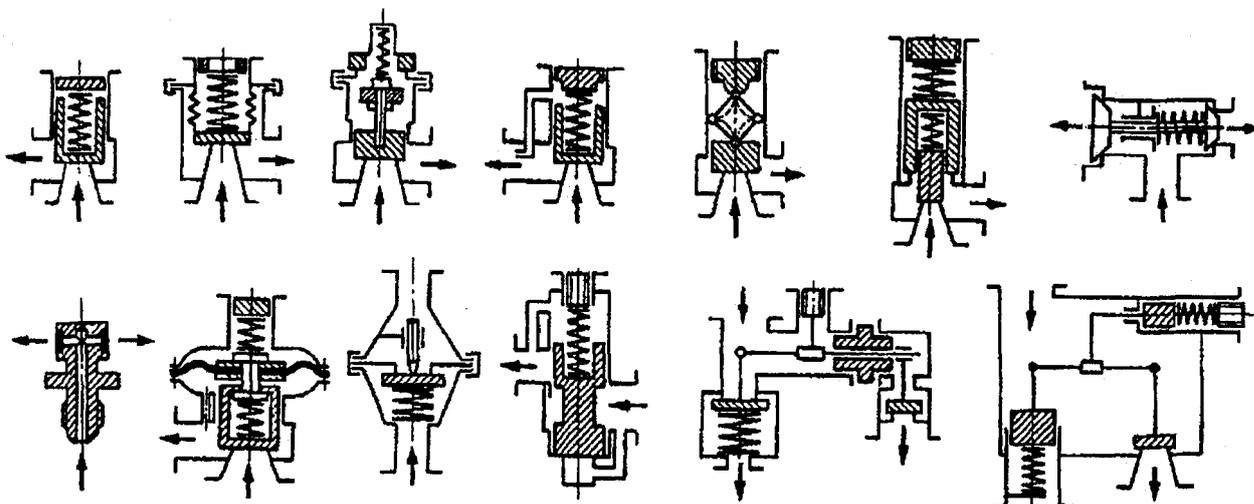


Рис.1.9. Клапаны прямого действия, в состав которых входит СПМ

В рамках настоящего анализа ограничимся исследованием применения СПМ в энергоустановках летательных аппаратов и транспортных средств.

Свободнопоршневая энергоустановка - преобразователь энергии, имеющий в своём составе одну или несколько свободнопоршневых машин, обеспечивающих требуемый процесс преобразования энергии.

Свободнопоршневая машина объёмного вытеснения - устройство, в состав которого входит как минимум один свободнопоршневой механизм с рабочей камерой (рис.1.10). Примером простейшего варианта подобного устройства может служить велосипедный или автомобильный ручной насос.

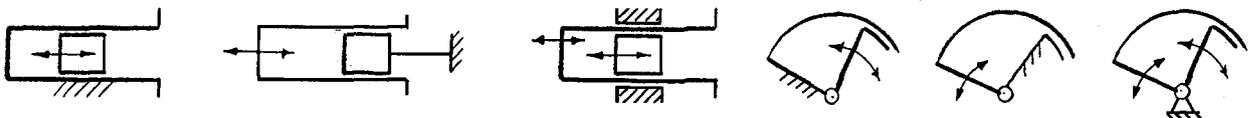


Рис.1.10. Примеры свободнопоршневых машин

Для превращения свободнопоршневого механизма в свободнопоршневую машину необходимо:

- ликвидировать зазоры между подвижным звеном и корпусом (обеспечить уплотнение подвижного звена в корпусе),
- обеспечить возможность достижения циклического процесса перемещения подвижного звена за счет организации рабочих процессов в рабочих камерах (в ДВС - смесеобразование, газообмен, зажигание смеси и т.д.).

Свободнопоршневой энергоблок в общем случае представляет собой соединение свободнопоршневого двигателя с генератором энергии (рис.1.11).

Свободнопоршневым двигателем называется двигатель, в котором ход поршня не ограничен механическими связями и может изменяться при изменении режима работы машины.

Двигатель - машина, преобразующая любой вид энергии в механическую энергию. Можно отметить, что последнее определение рассматривает двигатель как частный случай более общего понятия - преобразования энергии, так как в нём на входе подразумевается подача любого вида энергии, а на выходе - получение лишь механической энергии.

Преобразователь энергии - устройство, обеспечивающее преобразование одного вида энергии в другой (например, в двигателе внутреннего сгорания происходит преобразование энергии топлива в механическую, в электрогенераторе - механической в электрическую, в электродвигателе - электрической в механическую и т.д.).

Трансформатор энергии - устройство, обеспечивающее параметрические показатели одного и того же вида энергии (например, трансформатор переменного тока, пневмо-, гидротрансформатор и т.д.).

Поршень - звено, установленное с возможностью свободного перемещения в сопряжённом звене и с уплотнением в последнем.

Приведённое выше определение можно считать более общим по сравнению с ранее известным: "поршень - подвижная деталь машины или привода, плотно перекрывающая поперечное сечение цилиндра и перемещающаяся в направлении его оси" [36]. Это определение относится лишь к частному варианту поршня-ползуну кривошипно-ползунного механизма с прямолинейной направляющей. Поршень может перемещаться не только внутри кругового, но и торообразного корпуса (рис.1.2e). Поршень, в общем случае, может быть и неподвижным при подвижном корпусе (рис.1.10).

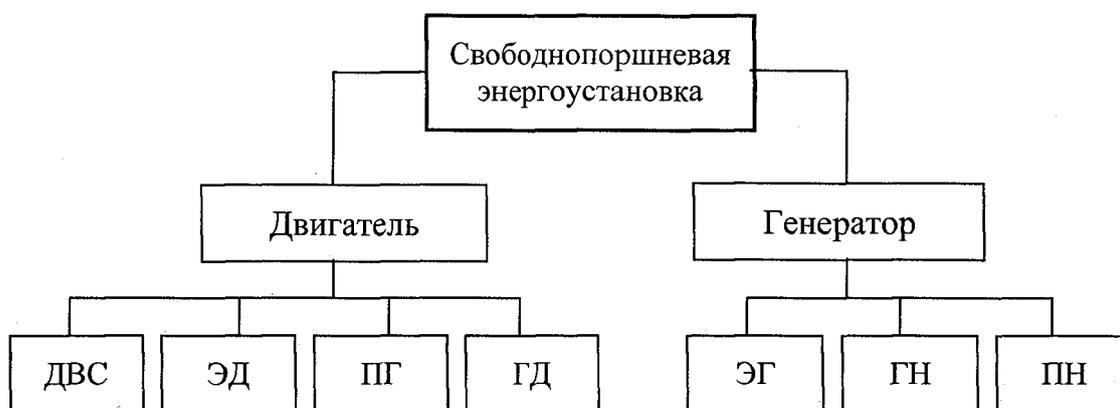


Рис.1.11. Варианты свободнопоршневых энергоустановок

ДВС - двигатель внутреннего сгорания

ЭД - электродвигатель

ПГ - пневмодвигатель

ГД - гидродвигатель

ЭГ - электрогенератор

ГН - газогенератор

ПН - пневмогенератор

Из огромного многообразия свободнопоршневых энергоустановок рассмотрим особенности лишь некоторых наиболее известных конструкций.

Одной из первых свободнопоршневых энергоустановок, используемых в авиации, стал свободнопоршневой компрессор, созданный итальянским конструктором Пескара в 1935 году. Такой компрессор применялся для привода винта реактивного вертолёта. В то же время советский инженер Н.Н. Ильин на авиазаводе №1 в Москве создал миниатюрный свободнопоршневой компрессор для пневматического запуска авиадвигателей. На рис.1.12 приведён эскизный проект переделки авиамодельного компрессионного мотора в свободнопоршневой компрессор [50]. Цилиндр и контрпоршень (регулирующий степень сжатия), а также карбюратор остались без изменений.

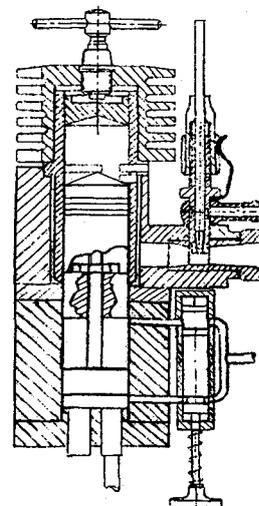


Рис.1.12. Авиационный свободнопоршневой компрессор

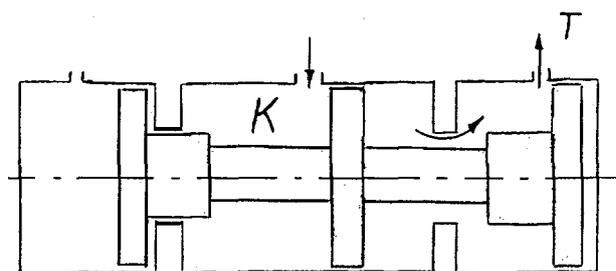


Рис.1.13. Двигатель Штельцера

Двухходовой линейный двигатель внутреннего сгорания (двигатель Штельцера) [20] экспонировался в 1990 г. на Ганноверской выставке, отличается предельной простотой и отсутствием конструктивных излишеств. Из подвижных частей в нём лишь один поршневой блок, свободно плавающий в цилиндрических расточках корпуса. Поршневой блок имеет 3 поршня - 2 рабочих на концах блока и компрессионный в средней части (рис.1.13).

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 мину-

ту, 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 уменьшается трение и нагревание.

Рабочие поршни служат поршнями насосов и компрессоров или, в сочетании с закреплёнными магнитами, якорем электрогенератора. Другой вариант - с полым штоком в поршневом блоке - позволяет использовать данный двигатель для привода турбины в гидродинамической установке.

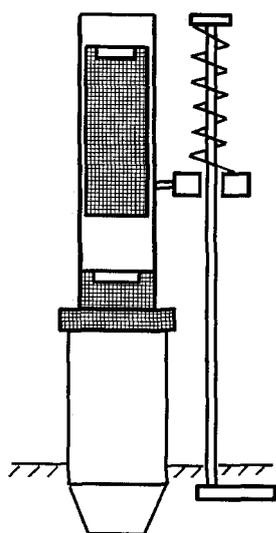


Рис.1.14. Дизель-молот

Дизель-молоты являются наиболее распространённым типом сваепогружающего оборудования [1]. На рис.1.14 приведена принципиальная схема наиболее простого по конструкции дизель-молота со свободнопадающим поршнем. Известны более сложные конструкции с дополнительными упругими связями между основанием и поршнем, между поршнем и цилиндром [1]. Подобная модификация традиционной принципиальной схемы позволяет увеличить быстроходность, а в конечном итоге и производительность установки.

Компрессор по патенту РФ №2084662 (рис.1.15) 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

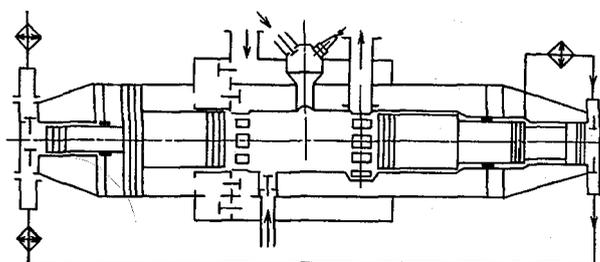


Рис.1.15. Свободнопоршневой компрессор

мёртвой точке на свечу подается напряжение и осуществляется воспламенение газовой смеси в камере сгорания. Рабочее тело сжимается в компрессорных полостях и буфере.

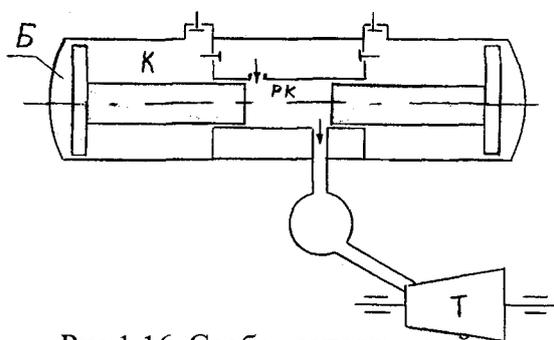


Рис.1.16. Свободнопоршневой генератор газов

Свободнопоршневые двигатели часто используют в качестве генераторов газа. В отличие от обычных двигателей внутреннего сгорания свободнопоршневой генератор газа не отдаёт энергию потребителю. Эффективную работу совершает газовая турбина [57]. На рис.1.16

приведена принципиальная схема энергоблока Дженерал моторс GMR 4-4 [57].

Одно из перспективных направлений применения свободнопоршневых машин объёмного вытеснения - в микрокриогенных системах на базе криогенной машины Сплит-Стирлинга с линейным приводом [21, 78, 88]. В качестве двигателя с циклом Стирлинга может быть использована и свободнопоршневая машина Веале (рис.1.17). Характеристики таких машин отличаются от двигателей с кривошипно-ползунным механизмом.

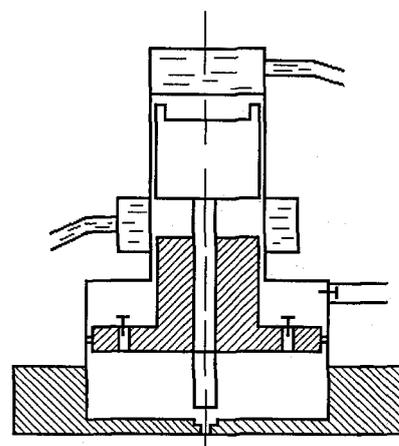


Рис.1.17. Свободнопоршневая машина Веале

Установки полностью герметичны, что позволяет использовать практически любые рабочие тела [8, 40, 49, 72].

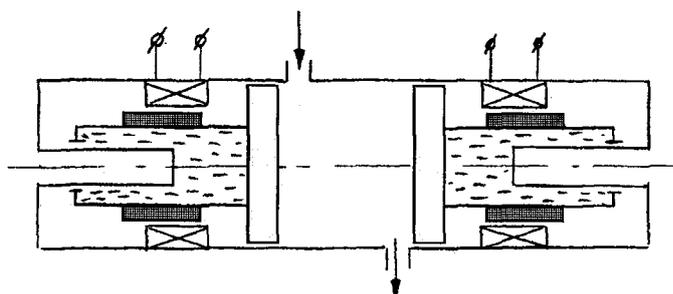


Рис.1.18. Свободнопоршневой электрогенератор " Monthelec"

Свободнопоршневой электрогенератор фирмы "Monthelec" [85] представляет собой СПМ с магнитоэлектрической системой (рис. 1.18). Поршень такой установки со- вмещён с постоянным магнитом, а

корпус - с индукционной катушкой. В результате взаимодействия магнита-поршня с обмоткой катушки наводится электродвижущая сила (ЭДС) индукции [5, 75]. 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.

Свободнопоршневые энергоустановки развиваются в основном по пути совершенствования частных конструктивных решений, не имея достаточной степени научного обоснования структурных и принципиальных схем решений. Так методика А.С. Орлина по расчёту свободнопоршневых генераторов газов [57] не исследует различные структурные схемы энергоустановок, а предлагает расчёт эффективности одного из вариантов (два поршня, одна общая рабочая камера) с корректировкой рабочего объёма. Существующая методика по расчёту быстроходного дизель-молота [1] использует только одну структурную схему с одним поршнем и одной или двумя рабочими камерами.

Отсутствие методики сравнительной качественной и количественной оценки совершенства различных вариантов свободнопоршневых энергоустановок на этапе предэскизного проектирования существенно ограничивает возможности поискового конструирования. По этой причине создание подобной методики представляет как научную, так и практическую ценность.

Поисковое конструирование на различных этапах использует общие методы структурного, кинематического и динамического синтеза. Общие методы синтеза [3, 42, 61] получили достаточно глубокое развитие применительно к отдельным видам механизмов - плоских механизмов [3], планетарных передач [65] и т.д. Можно считать, что методы синтеза свободнопоршневых механизмов наибольшее развитие получили применительно к задачам проектирования клапанных устройств и амортизаторов [79]. Несмотря на известные исследования по синтезу механизмов свободнопоршневых энергоустановок [1, 57] методы структурного синтеза подобных систем требуют дальнейшего развития.

На основе анализа конструкций известных свободнопоршневых преобразователей энергии и методов синтеза механизмов сформулированы следующие задачи настоящего исследования:

1. Анализ многообразия структур свободнопоршневых механизмов.
2. Создание основ методики композиции свободнопоршневых энергоустановок.
3. Развитие аналитической теории модульного моделирования механизмов преобразования возвратно-поступательного движения поршня во однонаправленное вращение выходного вала.
4. Поиск структурных схем двигателей с вращательным движением выходного вала, сохраняющих основные преимущества свободнопоршневого механизма.

При проектировании механизма выбираются и анализируются различные варианты конструкции элементов кинематических пар. По этой причине определённый практический интерес представляют структурные схемы с информацией о конструктивных элементах кинематических пар звеньев механизмов, которые можно назвать структурно-конструктивными схемами механизмов [68].

Для звена с двумя элементами кинематических пар можно анализировать четыре структурно-конструктивных варианта (табл.2.1). В общем случае, звено с двумя элементами кинематических пар может входить в состав подвижных соединений с различными степенями подвижности.

Ограничим анализируемое далее многообразие вариантов табл.2.1 сочетаниями одноподвижных вращательных и поступательных кинематических пар.

Звено с двумя элементами кинематических пар может образовать с другими звеньями механизма две вращательные, две поступательные или вращательную и поступательную кинематические пары. В табл.2.2-2.4 приведены структурно-конструктивные варианты звеньев с различными сочетаниями элементов одноподвижных кинематических пар.

Практический интерес представляет разделение элементов кинематических пар на нормальные, уширенные и эксцентрикковые. Для звена с двумя элементами вращательных кинематических пар *нормальным* (валом, втулкой) будем считать элемент, при котором её диаметр существенно меньше межосевого расстояния между центрами двух элементов кинематических пар; *уширенным* - с диаметром, соизмеримым с межосевым расстоянием, но не превышающим его; *эксцентрикковым* - с диаметром больше межосевого расстояния.

Для свободного звена с двумя элементами вращательных кинематических пар (табл.2.2) ранее были определены 36 основных модификаций её структурно-конструктивных вариантов (табл.2.5). Аналогичные модификации могут быть изображены и для вариантов табл.2.3 и 2.4.

Для четырёхзвенной плоской замкнутой кинематической цепи можно произвольно выбирать структурно-конструктивные варианты двух непосредственно не связанных между собой звеньев, при этом два других звена будут иметь

Таблица 2.1

Структурно-конструктивные варианты звена i с двумя элементами низших кинематических пар

			Элемент кинематической пары ($i-j$)	
			внутренний	наружный
			1	2
Элемент кинематической пары ($i-k$)	внутренний	1	1-1	1-1
	наружный	2	2-1	2-2

Таблица 2.2

Примеры структурно-конструктивных вариантов звена i с двумя элементами вращательных кинематических пар

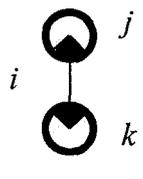
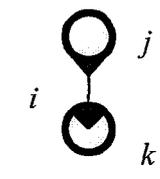
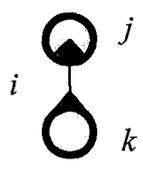
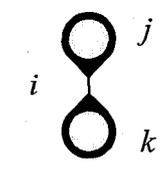
			Элемент кинематической пары ($i-j$)	
			вал	втулка
			1	2
Элемент кинематической пары ($i-k$)	вал	1		
	втулка	2		

Таблица 2.3

Примеры структурно-конструктивных вариантов звена i с двумя элементами поступательных кинематических пар

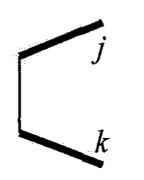
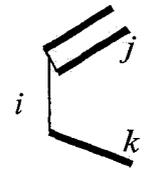
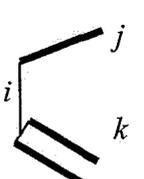
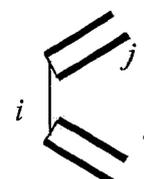
			Элемент кинематической пары ($i-j$)	
			шток	корпус
			1	2
Элемент кинематической пары ($i-k$)	шток	1		
	корпус	2		

Таблица 2.4

Примеры структурно-конструктивных вариантов звена i с элементами вращательной и поступательной кинематической пары

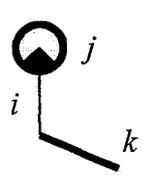
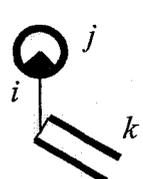
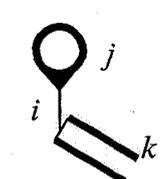
			Элемент кинематической пары ($i-j$)	
			вал	втулка
			1	2
Элемент кинематической пары ($i-k$)	шток	1		
	корпус	2		

Таблица 2.5

Основные модификации структурно-конструктивных вариантов звена i
с двумя элементами вращательных кинематических пар

		Элемент вращательной кинематической пары ($i - (i+1)$)						
		нормальный		уширенный		эксцентричный		
		вал	втулка	вал	втулка	вал	втулка	
		1	2	3	4	5	6	
Элемент вращательной кинематической пары ($(i-1) - i$)	нормальный	вал 1						
		втулка 2						
	уширенный	вал 3						
		втулка 4						
		вал 5						
		втулка 6						

вполне определённые модификации структурно-конструктивных вариантов. Таким образом, четырёхзвенный плоский механизм с учётом модификаций табл.2.5 может иметь $36 \times 36 = 1296$ структурно-конструктивных вариантов.

Анализ конструкций механизмов определил практическую целесообразность дальнейшего развития модификаций вариантов табл.2.5. Элементы кинематических пар звена могут выходить за основные габариты звена (табл.2.5), увеличивая общий осевой габарит детали. Однако, один или оба элемента кинематических пар могут размещаться в теле детали. С учётом последнего фактора получены дополнительные модификации структурно-конструктивных вариантов звена с двумя элементами кинематических пар (табл.2.6).

Не анализируя возможные варианты конструкции звена, отметим, что основные структурно-конструктивные его модификации (табл.2.5) содержат элементы кинематических пар, разнесённые относительно плоскости звена, дополнительные (табл.2.6) - с одной стороны относительно некоторой плоскости звена.

На рис.2.2а показан механизм со звеньями, соответствующим модификациям табл.2.5, на рис.2.2б - одно из звеньев, а на рис.2.2в три звена соответствуют модификациям табл.2.6. Звенья последнего варианта показаны отдельно на рис.2.2г.

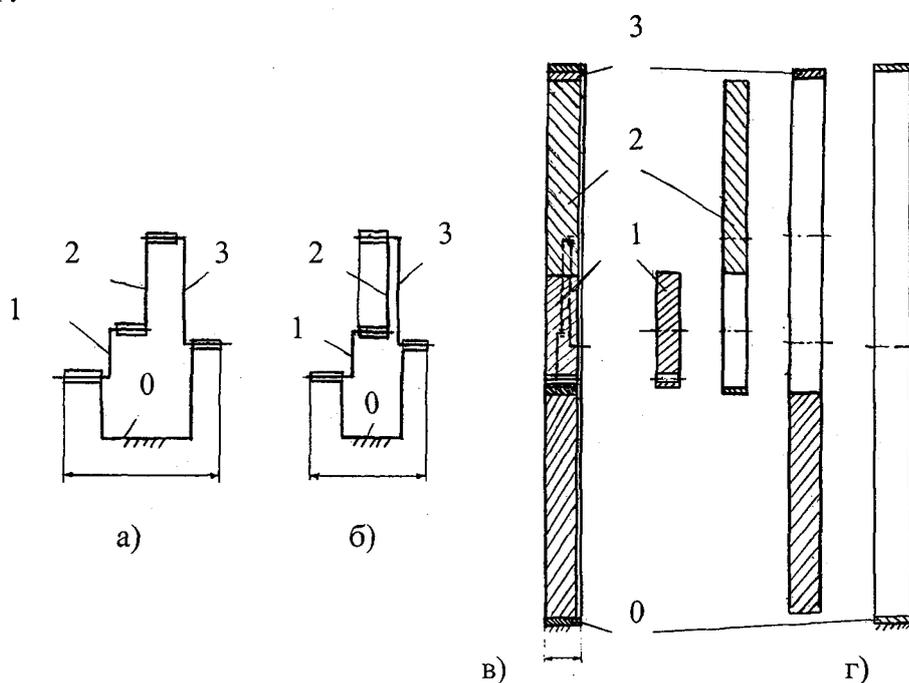


Рис.2.2. Разные структурно-конструктивные схемы двух механизмов (а и б) с одинаковой структурной схемой

Таблица 2.6

Дополнительные модификации структурно-конструктивных вариантов звена i с двумя элементами вращательных кинематических пар

		Элемент вращательной кинематической пары $(i - (i+1))$					
		нормальный		уширенный		эксцентричный	
		вал	втулка	вал	втулка	вал	втулка
		1	2	3	4	5	6
нормальный	вал 1	$(i - (i+1))$ i	 $((i - 1) - i)$	 i	 $((i - 1) - i)$	 i	 $((i - 1) - i)$
	втулка 2	 i	 $((i - 1) - i)$	 i	 $((i - 1) - i)$	 i	 $((i - 1) - i)$
уширенный	вал 3	 i	 $((i - 1) - i)$	 i	 $((i - 1) - i)$	 i	 $((i - 1) - i)$
	втулка 4	 i	 $((i - 1) - i)$	 i	 $((i - 1) - i)$	 i	 $((i - 1) - i)$
эксцентричный	вал 5	 i	 $((i - 1) - i)$	 i	 $((i - 1) - i)$	 i	 $((i - 1) - i)$
	втулка 6	 i	 $((i - 1) - i)$	 i	 $((i - 1) - i)$	 i	 $((i - 1) - i)$

Структурная схема механизмов рис.2.2а, 2.2б и заменяющего механизм устройства рис.2.2в одна и та же, но осевые габариты у них разные, а в механизме, приведённом на рис.2.2в, может возникнуть явление самоторможения.

Дополнительные модификации табл.2.6 расширяют многообразие возможных вариантов структурно-конструктивных схем механизмов. Так, четырёхзвенная плоская замкнутая кинематическая цепь с учётом модификаций табл.2.5 и 2.6 имеет $72 \times 72 = 5184$ структурно-конструктивных варианта.

Приведённый выше подход к анализу структурно-конструктивных вариантов механизма допускает возможность дальнейшего развития. Многообразие возможных вариантов кинематических цепей существенно расширяется при дополнительном рассмотрении - кроме вращательных и поступательных - вращательно-поступательных кинематических пар, в частности винтовых. Определённый теоретический и практический интерес может представить расширение понятия "поступательная кинематическая пара", учитывающего не только линейное, но и нелинейное, например, круговое, относительное движение образующих его звеньев.

Необходимо также учитывать, что все приведённые выше результаты получены лишь для звена с двумя элементами одноподвижных кинематических пар. В общем случае, число элементов кинематических пар звена может быть более двух. Известно пять классов кинематических пар, каждая из которых имеет различные структурно-конструктивные варианты.

В рамках настоящего исследования ограничимся анализом структурно-конструктивных схем механизмов, звенья которых образуют совмещённые подвижные соединения. Такие соединения наиболее часто встречаются при структурном анализе свободнопоршневых энергоустановок.

2.1.2. Совмещённые подвижные соединения звеньев

2.1.2.1. Условия образования совмещённых подвижных соединений

Звенья механизма образуют простые и сложные кинематические цепи. Простейшая трёхзвенная кинематическая цепь имеет в своём составе звено с двумя элементами кинематических пар, образующее с сопряжёнными звеньями одно-пятитиподвижное соединение (табл.2.7).

Таблица 2.7

Варианты сочетаний кинематических пар трёхзвенной кинематической цепи

		Число подвижностей кинематической пары ($i - (i+1)$)				
		1	2	3	4	5
Число подвижностей кинематической пары ($(i - 1) - i$)	1					
	2					
	3					
	4					
	5					

 - варианты, аналогичные другим сочетаниям кинематических пар

Кинематическую пару образуют два элемента, принадлежащие разным звеньям. При отсутствии зазоров совпадают оси двух элементов поступательной и вращательной пары, а также начало осей координат шаровой пары.

Ограничимся анализом плоских трёхзвенных кинематических цепей, звенья которых совершают движения в параллельных плоскостях и образуют од-

но неподвижные вращательные (В) и поступательные (П) кинематические пары. Исключение из рассмотрения вращательно-поступательных кинематических пар объясняется тем, что поступательное перемещение одного из звеньев такой пары происходит в плоскости, перпендикулярной плоскости движения прочих звеньев цепи, т.е. плоский механизм превращается в пространственный.

В трёхзвенной кинематической разомкнутой цепи $(i - 1) - i - (i + 1)$ среднее звено i имеет два элемента кинематических пар $((i - 1) - i)$ и $(i - (i + 1))$.

Проекция a_i межосевого расстояния осей кинематических пар звена i с двумя элементами вращательных кинематических пар на плоскость, параллельную плоскостям движения звеньев (рис.2.3а), пояснений не требует.

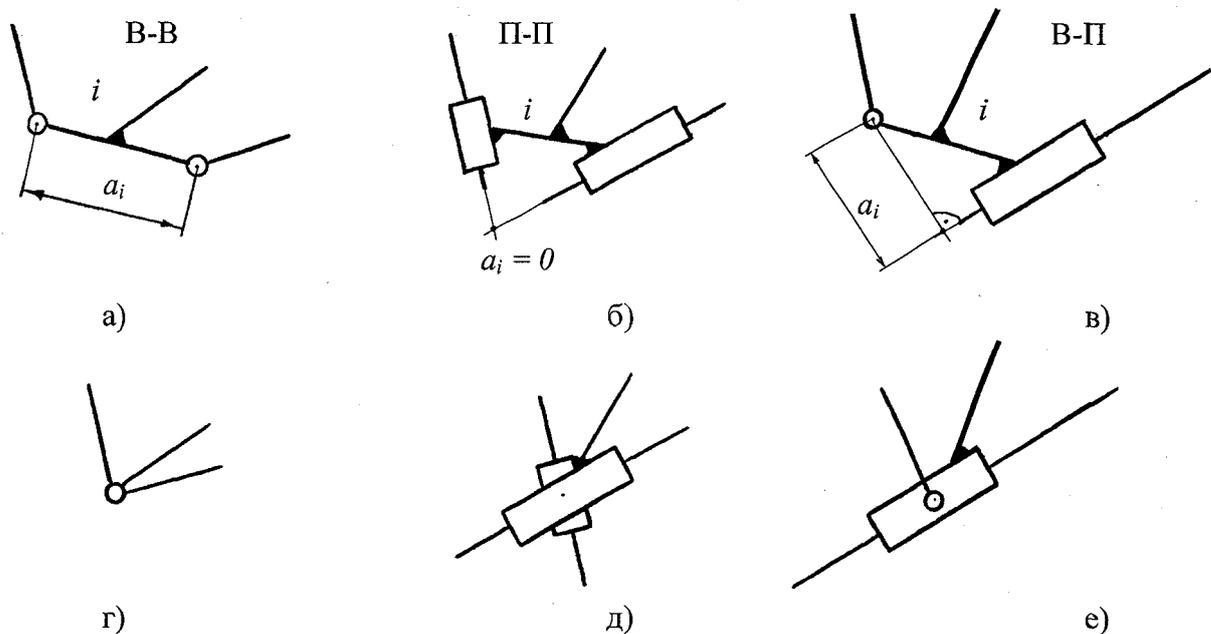


Рис.2.3. Совмещённые подвижные сочетания двух кинематических пар

За расчётную ось элемента линейной поступательной кинематической пары звена i принимаем траекторию любой точки звена j , связанного с этой парой.

Проекция a_i межосевого расстояния осей кинематических пар звена i с двумя элементами поступательных кинематических пар на плоскость, параллельную плоскостям движения звеньев (рис.2.3б), равна нулю, так как их оси, в общем случае, пересекаются в плоскости проекции.

Проекция a_i межосевого расстояния осей элементов кинематических пар звена с элементами вращательной и поступательной кинематических пар на

плоскость параллельную плоскостям движения звеньев (рис.2.3в), равна кратчайшему расстоянию между их осями в плоскости проекции. Частный случай: расчётные оси элементов поступательных кинематических пар взаимопараллельны. В этом случае звено с двумя элементами кинематических пар можно рассматривать как звено с взаимопараллельными или с совпадающими осями кинематических пар.

Для плоской кинематической цепи параметр a_i полностью характеризует межосевое расстояние элементов кинематических пар, для пространственной - необходимо дополнительно знать расстояние b_i между плоскостями движения звеньев $(i - 1)$ и $(i+1)$, тогда межосевое расстояние $A_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2}$.

В частном случае, при $a_i = 0$ совмещаются изображения кинематических пар. Проекции осей кинематических пар $((i - 1) - i)$ и $(i - (i+1))$ могут совпадать или пересекаться.

При совмещении (рис.2.3г) осей кинематических пар $((i - 1) - i)$ и $(i - (i+1))$ образуется совмещённое подвижное соединение звеньев $(i - 1)$, i и $(i+1)$; при их пересечении (рис.2.3д, е), т.е. при наличии общей точки - совмещённое изображение, но не совмещённое подвижное соединение. Общее определение совмещённого подвижного соединения можно сформулировать следующим образом:

Совмещённое подвижное соединение звеньев механизма - это подвижное соединение звеньев, как минимум, с одной общей осью.

Для многозвенного совмещённого подвижного соединения с вращательными кинематическими парами употребляют термин "сложный шарнир" (двухподвижный, трёхподвижный и т.д.) [61]. Отметим, что термин "шарнир" (нем. *Scharnier*, от франц. *charniere*, от лат. *cardo (cardinic)* - дверная петля) означает - кинематическая вращательная пара. Сложный шарнир - по определению - содержит лишь вращательные кинематические пары. Предлагаемый термин "совмещённое подвижное соединение" обобщает совмещения как вращательных, так и прочих видов кинематических пар.

Кинематическая пара - подвижное соединение двух (пары) звеньев.

Совмещённое подвижное соединение имеет в своём составе две и более кинематические пары.

Совмещённое подвижное соединение трёх звеньев, имеющее в своём составе кинематические пары с несколькими степенями подвижности, может быть одноосным (рис.2.4а, б, в), двухосным (рис.2.4г) и трёхосным (рис.2.4д, е).

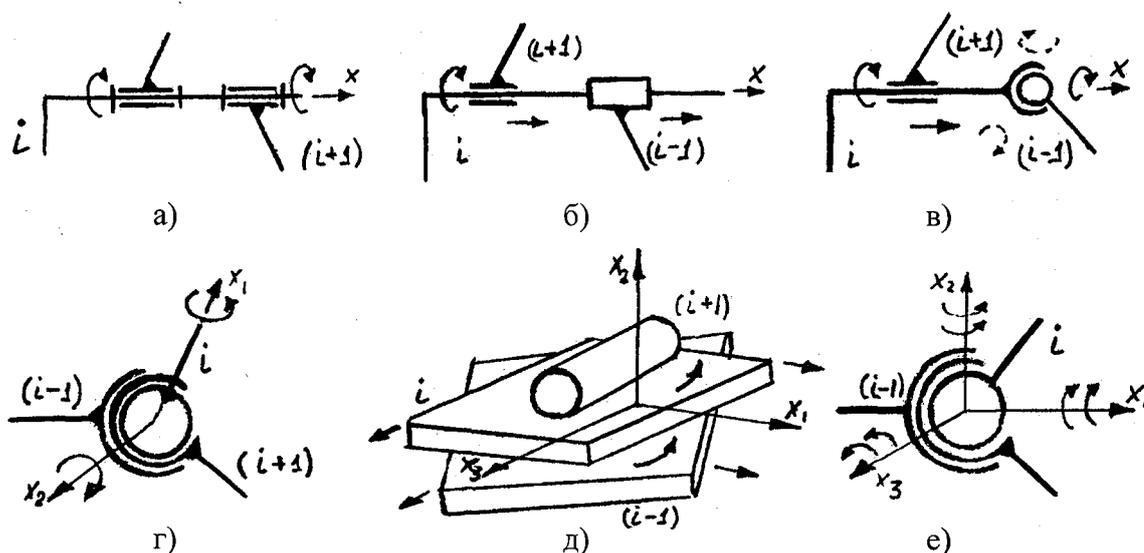


Рис.2.4. Совмещённые подвижные соединения трёх звеньев

Совмещённое подвижное соединение звеньев, образующих одноподвижные кинематические пары, имеет единственную общую ось. Такие соединения могут образовывать все варианты одноподвижных кинематических пар: конические вращательные, цилиндрические вращательные и поступательные, плоскостные поступательные и винтовые, кулачковые вращательно-поступательные (рис.2.5).

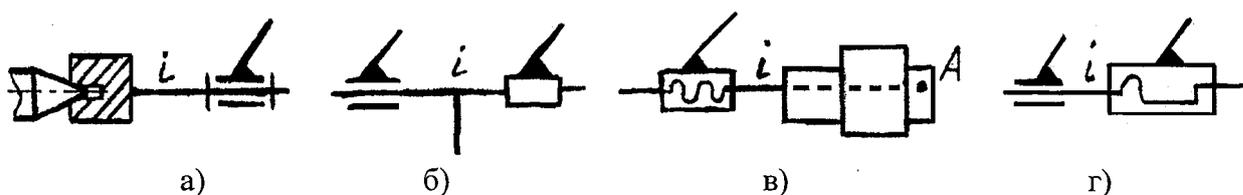


Рис.2.5. Совмещённые подвижные соединения звеньев, образующих одноподвижные кинематические пары

Отметим, что в поступательной кинематической паре за расчётную ось можно принимать произвольную прямую, совпадающую с траекторией движения в любой точке одного из звеньев в относительном движении, например, точка А на рис.2.5в.

Поступательные кинематические пары, впрочем как и вращательные, в совмещённом подвижном соединении трёх звеньев могут быть расположены последовательно вдоль общей оси (*осевой* вариант, рис.2.6а) или её элементы могут быть вставлены друг в друга (*радиальный*, телескопический вариант, рис.2.6б).

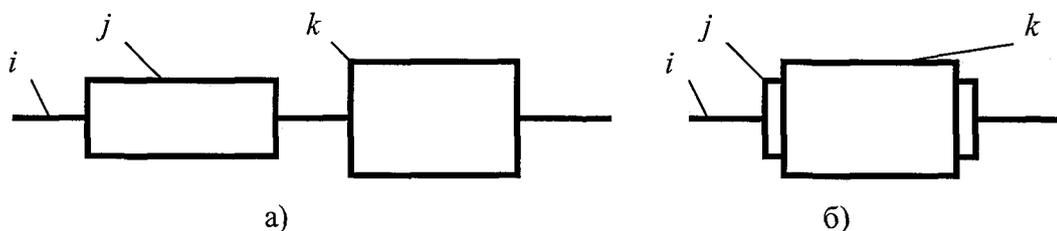


Рис.2.6. Осевое (а) и радиальное (б) подвижное соединения трёх звеньев i, j и k
Рассмотрим отдельно каждый из этих вариантов.

2.1.2.2. Совмещённые осевые подвижные соединения

Исследуем структуры совмещённых подвижных соединений с линейным размещением поступательных кинематических пар вдоль общей оси.

Структурно-конструктивные формулы и примеры кинематических схем совмещённых осевых одноподвижных соединений трёх звеньев i, j и k приведены в табл.2.8. Отметим, что кинематические схемы варианта 3 структурно-конструктивной формулы для сочетаний В-В и П-П кинематических пар аналогичны кинематическим схемам варианта 2, т.к. кинематические пары $(i-j)$ и $(i-k)$ абсолютно идентичны. Однако, для сочетания В-П аналогии между вариантами 2 и 3 структурно-конструктивной формулы табл.2.8 не наблюдается из-за конструктивных различий кинематических пар $(i-j)$ и $(i-k)$.

Применительно к задачам композиции механизмов свободнопоршневых энергоустановок основное внимание при дальнейшем анализе уделим частному виду совмещённых подвижных соединений с поступательными кинематическими парами.

Структурно-конструктивные формулы и примеры кинематических схем соответствующих им линейных совмещённых осевых двухподвижных соединений приведены в табл.2.9.

Структурная и структурно-конструктивная формулы совмещённых осевых
одноподвижных соединений трёх звеньев i, j и k

№	Структурная формула	Структурно-конструктивная формула	Примеры кинематических схем		
			$(i-j)$ вращательная $(i-k)$ вращательная	$(i-j)$ поступательная $(i-k)$ поступательная	$(i-j)$ вращательная $(i-k)$ поступательная
1	$(i-j) - (i-k)$	$(i_n-j_\theta) - (i_n-k_\theta)$			
2		$(i_n-j_\theta) - (i_\sigma-k_\theta)$			
3		$(i_\sigma-j_H) - (i_n-k_\theta)$	Аналогичны варианту 2 при $j \leftrightarrow k$		
4		$(i_\sigma-j_H) - (i_\sigma-k_H)$			

Структурно-конструктивные формулы трёхзвенных совмещённых осевых двухподвижных соединений

№	Структурная формула	Структурно-конструктивная формула	Примеры кинематических схем
1	$(i-j) - (i-k)$	$(i_n-j_e) - (i_n-k_e)$	
2		$(i_n-j_e) - (i_e-k_n)$	
3		$(i_e-j_n) - (i_n-k_e)$	Аналогия с вариантом 2 при $j \leftrightarrow k$
4		$(i_e-j_n) - (i_e-k_n)$	

Свободноподвижный элемент поступательной кинематической пары может иметь ограниченное перемещение вдоль её оси. Ограничители движения, например крышки, ограничительные кольца, упоры, могут быть установлены на внутреннем или наружном элементах кинематической пары. Рассмотрим вариант постановки ограничителей движения, которые далее будем называть "крышками" на наружном элементе кинематической пары $(i-j)$, при этом выделим жирными линиями торцы контактирующих с ними звеньев.

В свободнопоршневом механизме ограничители движения могут образовывать рабочие камеры, тем самым превращая свободнопоршневой механизм в свободнопоршневую машину объёмного вытеснения (рис.1.10).

Также, для превращения свободнопоршневого механизма в свободнопоршневую машину необходимо ликвидировать зазоры между подвижным звеном и корпусом (уплотнение подвижного звена в корпусе), обеспечить возможность достижения циклического процесса перемещения подвижного звена за счет организации рабочих процессов в рабочих камерах.

Постановку крышек на торцах наружных элементов кинематической пары в структурно-конструктивных формулах будем обозначать индексом "к".

Структурно-конструктивные формулы трёхзвенных осевых подвижных соединений с ограничителями движения на наружном элементе одной кинематической пары приведены в табл.2.10.

Структурно-конструктивные формулы трёхзвенных осевых подвижных соединений с ограничителями движения на наружном элементе двух кинематических пар приведены в табл.2.11.

Число структурно-конструктивных формул в табл.2.11 существенно больше, чем в табл.2.10. Однако, число структурно-конструктивных формул табл.2.9, преобразованных в структурно-конструктивные формулы табл.2.11, меньше, чем в табл.2.10, т.к. в табл.2.11 анализируются две идентичные, а в табл.2.10 - различные по конструкции кинематические пары.

Аналогичные результаты могут быть получены и для других сочетаний кинематических пар в совмещённом осевом подвижном соединении трёх и более звеньев. Увеличение числа звеньев существенно увеличивает число структурно-конструктивных вариантов возможных соединений. Так, если три звена i , j , k образуют лишь одно основное сочетание $(i - j) - (i - k)$, то четыре звена i , j , k , l - два основных сочетания $(i - j) - (i - k) - (i - l)$ и $(i - j) - (i - k) - (k - l)$ и т.д.

Полученные результаты представляют практический интерес, в частности, при поиске вариантов механизмов линейных свободнопоршневых машин.

Таблица 2.10

Структурно-конструктивные формулы трёхзвенных осевых совмещённых подвижных соединений с ограничителями движения на наружном элементе одной кинематической пары

№	Структурно-конструктивная формула табл.2.9	Структурно-конструктивная формула	Примеры кинематических схем	№	Структурно-конструктивная формула табл.9	Структурно-конструктивная формула	Примеры кинематических схем	
1	$(i_n - j_e) - (i_n - k_e)$	$\kappa(i_n - j_e) - (i_n - k_e)$		7	$(i_e - j_n) - (i_n - k_e)$	$\kappa(i_e - j_n)_k - (i_n - k_e)$		
2		$(i_n - j_e)_k - (i_n - k_e)$		8		$(i_e - j_n) - (i_n - k_e)$	$(i_e - j_n)_k - (i_n - k_e)$	
3		$\kappa(i_n - j_e)_k - (i_n - k_e)$		9		$\kappa(i_e - j_n)_k - (i_n - k_e)$		
4	$(i_n - j_e) - (i_e - k_n)$	$\kappa(i_n - j_e) - (i_e - k_n)$		10	$(i_e - j_n) - (i_e - k_n)$	$\kappa(i_e - j_n) - (i_e - k_n)$		
5		$(i_n - j_e)_k - (i_e - k_n)$		11		$(i_e - j_n) - (i_e - k_n)$	$(i_e - j_n)_k - (i_e - k_n)$	
6		$\kappa(i_n - j_e)_k - (i_e - k_n)$		12		$\kappa(i_e - j_n)_k - (i_e - k_n)$		

Таблица 2.11

Структурно-конструктивные формулы трёхзвенных совмещённых осевых подвижных соединений с ограничителями движения на наружных элементах двух кинематических пар

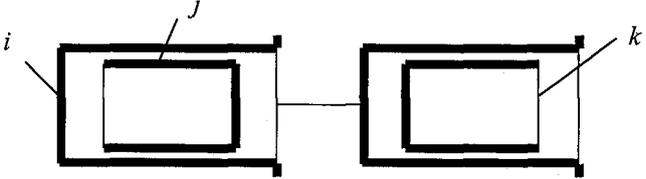
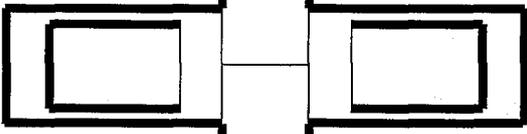
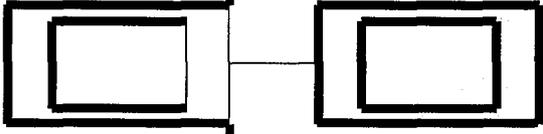
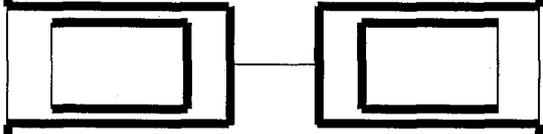
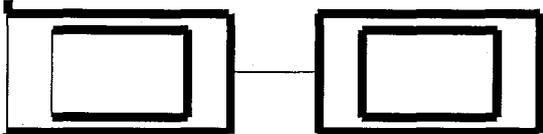
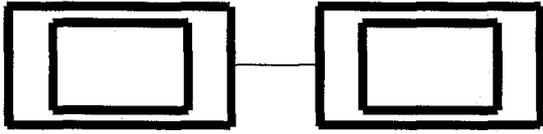
№	Структурно-конструктивная формула (табл.2.9)	Структурно-конструктивная формула	Примеры кинематических схем
1	2	3	4
1	$(i_n - j_e) - (i_n - k_e)$	$\kappa(i_n - j_e) - \kappa(i_n - k_e)$	
2		$\kappa(i_n - j_e) - (i_n - k_e)_\kappa$	
3		$\kappa(i_n - j_e) - \kappa(i_n - k_e)_\kappa$	
4		$(i_n - j_e)_\kappa - \kappa(i_n - k_e)$	
5		$(i_n - j_e)_\kappa - (i_n - k_e)_\kappa$	<p><i>Аналогия с вариантом 1 при $j \leftrightarrow k$</i></p>
6		$(i_n - j_e)_\kappa - \kappa(i_n - k_e)_\kappa$	
7		$\kappa(i_n - j_e)_\kappa - (i_n - k_e)$	<p><i>Аналогия с вариантом 3 при $j \leftrightarrow k$</i></p>
8		$\kappa(i_n - j_e)_\kappa - \kappa(i_n - k_e)$	<p><i>Аналогия с вариантом 6 при $j \leftrightarrow k$</i></p>
9		$\kappa(i_n - j_e)_\kappa - \kappa(i_n - k_e)_\kappa$	

Таблица 2.11
(продолжение)

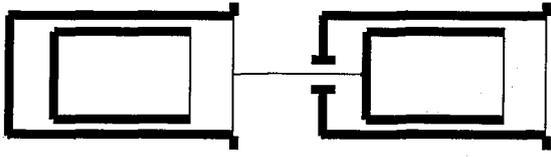
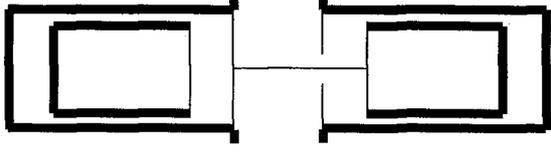
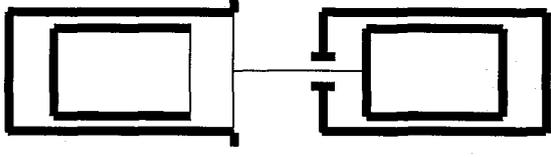
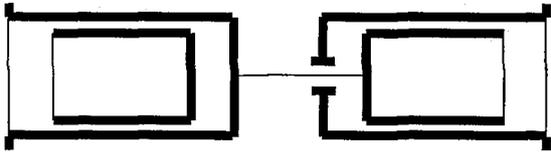
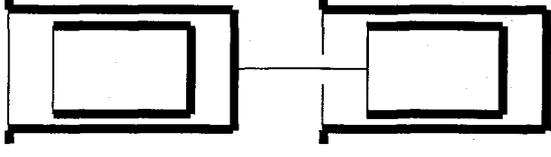
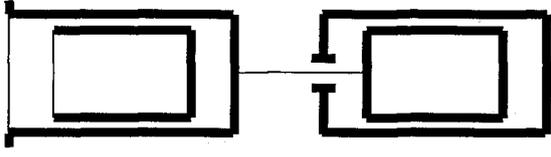
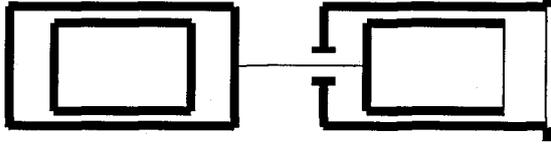
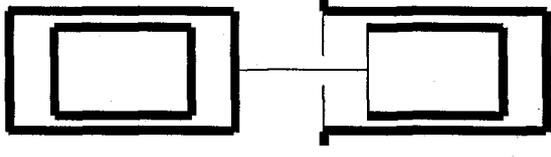
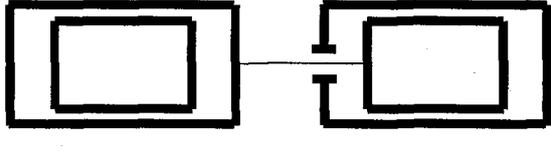
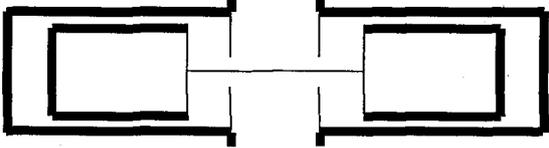
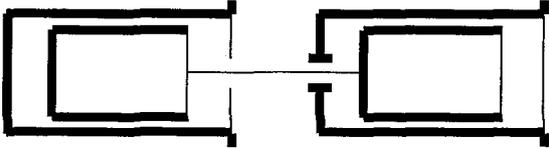
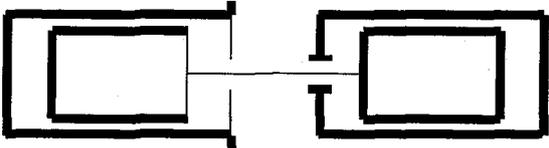
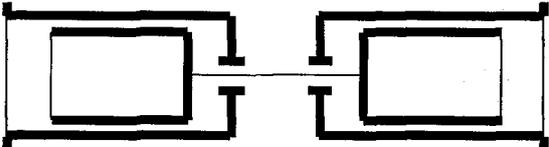
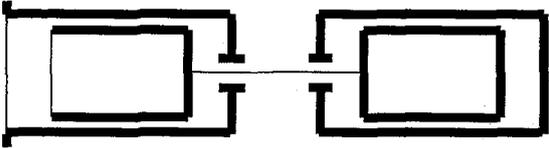
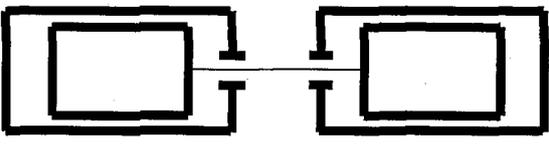
1	2	3	4
10	$(i_H - j_\Theta) - (i_\Theta - k_H)$	$\kappa(i_H - j_\Theta) - \kappa(i_\Theta - k_H)$	
11		$\kappa(i_H - j_\Theta) - (i_\Theta - k_H)_\kappa$	
12		$\kappa(i_H - j_\Theta) - \kappa(i_\Theta - k_H)_\kappa$	
13		$(i_H - j_\Theta)_\kappa - \kappa(i_\Theta - k_H)$	
14		$(i_H - j_\Theta)_\kappa - (i_\Theta - k_H)_\kappa$	
15		$(i_H - j_\Theta)_\kappa - \kappa(i_\Theta - k_H)_\kappa$	
16		$\kappa(i_H - j_\Theta)_\kappa - \kappa(i_\Theta - k_H)$	
17		$\kappa(i_H - j_\Theta)_\kappa - (i_\Theta - k_H)_\kappa$	
18		$\kappa(i_H - j_\Theta)_\kappa - \kappa(i_\Theta - k_H)_\kappa$	

Таблица 2.11

(окончание)

1	2	3	4
19	$(i_{\sigma-j_H}) - (i_{\sigma-k_H})$	$\kappa(i_{\sigma-j_H}) - (i_{\sigma-k_H})_{\kappa}$	
20		$\kappa(i_{\sigma-j_H}) - \kappa(i_{\sigma-k_H})$	
21		$\kappa(i_{\sigma-j_H}) - \kappa(i_{\sigma-k_H})_{\kappa}$	
22		$(i_{\sigma-j_H})_{\kappa} - \kappa(i_{\sigma-k_H})$	
23		$(i_{\sigma-j_H})_{\kappa} - (i_{\sigma-k_H})_{\kappa}$	<p><i>Аналогия с вариантом 20 при $j \leftrightarrow k$</i></p>
24		$(i_{\sigma-j_H})_{\kappa} - \kappa(i_{\sigma-k_H})_{\kappa}$	
25		$\kappa(i_{\sigma-j_H})_{\kappa} - \kappa(i_{\sigma-k_H})$	<p><i>Аналогия с вариантом 24 при $j \leftrightarrow k$</i></p>
26		$\kappa(i_{\sigma-j_H})_{\kappa} - (i_{\sigma-k_H})_{\kappa}$	<p><i>Аналогия с вариантом 21 при $j \leftrightarrow k$</i></p>
27		$\kappa(i_{\sigma-j_H})_{\kappa} - \kappa(i_{\sigma-k_H})_{\kappa}$	

2.1.2.3. Совмещённые радиальные подвижные соединения

При выборе существенных конструктивных признаков для развития структурных схем в структурно-конструктивные учитываем практическую направленность ожидаемых результатов. При анализе осевых подвижных соединений нас интересовала общая конфигурация (вид, очертание, образ) элементов кинематических пар - вал или втулка (внутренний или наружный элемент кинематической пары). В радиальном подвижном соединении трёх звеньев среднее звено является наружным по отношению к одному и внутренним по отношению ко второму сопрягаемому с ним звеном, т.е. имеется определённость общей формы детали.

Практический интерес при анализе радиальных подвижных соединений представляет учёт эксцентриситеты сопряжённых поверхностей звеньев.

Структурно-конструктивные формулы и примеры кинематических схем трёхзвенных совмещённых радиальных подвижных соединений с цилиндрическими одно- или двухподвижными кинематическими парами приведены в табл.2.12.

На первый взгляд данные табл.2.12 представляют лишь абстрактный результат формативных преобразований, однако эти результаты имеют практическое значение при синтезе свободнопоршневых механизмов.

Следует отметить, что при наличии эксцентриситета осей в поступательной кинематической паре подвижное соединение остаётся быть совмещённым (рис.2.5в), т.е. данные табл.2.12 имеют прямое отношение к теме настоящего исследования.

Применительно к задачам настоящего исследования ограничимся преобразованиями структурно-конструктивной формулы $\frac{(j-k)}{(i-j)}$ при постановке "крышек" на торцах звена j (табл.2.13), тем самым, превращая свободнопоршневой механизм в свободнопоршневую машину объёмного вытеснения (рис.1.10).

Таблица 2.12

Структурно-конструктивная формула трёхзвенного радиального совмещённого подвижного соединения с цилиндрическими парами i, j и k

Структурно-конструктивные формулы и примеры кинематических схем						
		j		j_{ε}		
		k	k_{ε}	k	k_{ε}	
i	$\frac{(j-k)}{(i-j)}$		$\frac{(j-k_{\varepsilon})}{(i-j)}$		$\frac{(j_{\varepsilon}-k_{\varepsilon})}{(i-j_{\varepsilon})}$	
	$\frac{(j-k)}{(i_{\varepsilon}-j)}$		$\frac{(j-k_{\varepsilon})}{(i_{\varepsilon}-j)}$		$\frac{(j_{\varepsilon}-k_{\varepsilon})}{(i_{\varepsilon}-j_{\varepsilon})}$	

ε - эксцентриситет

Таблица 2.13

Некоторые модификации структурно-конструктивной формулы $\frac{(j-k)}{(i-j)}$

Структурно-конструктивные формулы		
$\frac{(j-k)}{\kappa(i-j)}$	$\frac{(j-k)}{(i-j)_{\kappa}}$	$\frac{(j-k)}{\kappa(i-j)_{\kappa}}$

Полученные результаты используются при синтезе свободнопоршневых механизмов.

2.1.2.4. Совмещённые смешанные подвижные соединения

Совмещение осей элементов кинематических пар звеньев позволяет создавать подвижные соединения смешанных видов, имеющих различные виды сочетаний кинематических пар. Анализ множества структурных формул совмещённых n -звенных смешанных подвижных соединений выходит за рамки настоящего исследования. Рассмотрим модификации лишь одной структурной формулы $\frac{(j_1 - k_1)}{(i_1 - j_1)} - \frac{(j_2 - k_2)}{(i_2 - j_2)}$ совмещённого пятизвенного смешанного подвижного соединения звеньев $i_1, j_1, k_1, i_2, j_2, k_2$ с жёсткой связью между двумя из них.

При последовательном размещении на общей оси двух соединений табл.2.13 получим варианты радиальных подвижных соединений (табл.2.14).

Таблица 2.14

Структурно-конструктивные варианты размещения на общей оси совмещённых радиальных подвижных соединений $\frac{(j_1 - k_1)}{(i_1 - j_1)}$ и $\frac{(j_2 - k_2)}{(i_2 - j_2)}$

Структурно-конструктивные формулы	Примеры кинематических схем		
	$\frac{(j_1 - k_1)}{k(i_1 - j_1)}$	$\frac{(j_1 - k_1)}{(i_1 - j_1)_k}$	$\frac{(j_1 - k_1)}{k(i_1 - j_1)_k}$
$\frac{(j_2 - k_2)}{k(i_2 - j_2)}$			
$\frac{(j_2 - k_2)}{(i_2 - j_2)_k}$			
$\frac{(j_2 - k_2)}{k(i_2 - j_2)_k}$			

Модификации совмещения $\frac{(j_1 - k_1)}{(i_1 - j_1)}$ и $\frac{(j_2 - k_2)}{(i_2 - j_2)}$ не являются соединениями из-за отсутствия кинематической связи между составляющими их радиальными подвижными соединениями. Достаточно ввести единственную такую связь, например, между звеньями i_1 и i_2 , и получим одно из трёхзвенных совмещённых осевых подвижных соединений табл.2.11.

Введение жёсткой связи между любыми двумя звеньями разных множеств $\{i_1, j_1, k_1\}$ и $\{i_2, j_2, k_2\}$ т.е. замена двух звеньев новым звеном, образующим кинематические пары в двух совмещённых радиальных подвижных соединениях, преобразует варианты размещений табл.2.14 в совмещённые пятизвенные радиально-осевые подвижные соединения.

Каждое из звеньев i_1, j_1, k_1 можно жёстко связать с любым из звеньев i_2, j_2, k_2 , т.е. каждая кинематическая схема табл.2.14 имеет 9 возможных модификаций.

Таким образом, табл.2.14 содержит информацию о 81-ом структурно-конструктивном варианте совмещённого пятизвенного радиально-осевого подвижного соединения.

Совмещённые подвижные соединения звеньев табл.2.10-2.14 представляют собой банк структурных схем, на основе которых создаются механизмы свободнопоршневых машин.

2.1.3. Обращение совмещённого подвижного соединения в свободнопоршневой механизм

2.1.3.1. Выбор стойки

Любое подвижное соединение звеньев табл.2.10-2.14 при соответствующем конструктивном исполнении может иметь, как минимум, одну рабочую камеру переменного объёма. Элементы уплотнения кинематической пары "поршень-цилиндр", представленной на этих схемах соответственно "внутренним" и "наружным" элементами, не изменяют её структуру.

Любое подвижное соединение звеньев табл.2.10-2.14 превращается в механизм при обращении в стойку, как минимум, одного из его звеньев.

Обращение в стойку звена i превращает соединение табл.2.10 в механизм со степенью подвижности $W = 2$.

Обращение в стойку звеньев j и k превращает соединение табл.2.10 и 2.11 в механизм со степенью подвижности $W = 1$.

Обращение в стойку любого из звеньев табл.2.13 превращает соединение в механизм со степенью подвижности $W = 2$.

Обращение в стойку звеньев k_1 и k_2 превращает соединение табл.2.14 в механизм со степенью подвижности $W = 4$.

2.3.2. Введение дополнительных связей звеньев

Кинематические схемы известных свободнопоршневых энергоустановок, существенно различающихся по конструкции и назначению, можно синтезировать на основе структурно-конструктивных вариантов соединений табл.2.14.

Простейшая свободнопоршневая энергоустановка имеет в составе кинематической схемы всего лишь два звена i_1 и j_1 - поршень и цилиндр дизель-молота [1], взаимодействующий с забиваемой сваей (рис.2.7а).

Кинематическая схема электрогенератора (рис.2.7б) содержит поршень i_1 , электромагнит i_2 , основание k_1 , индукционную катушку j_2 , а также - дополнительные к схемам табл.2.14 - связи: жёсткую $s(i_1 - i_2)$, $s(i_1 - k_2)$, $s(j_2 - k_1)$ и упругую $s(i_2 - k)$.

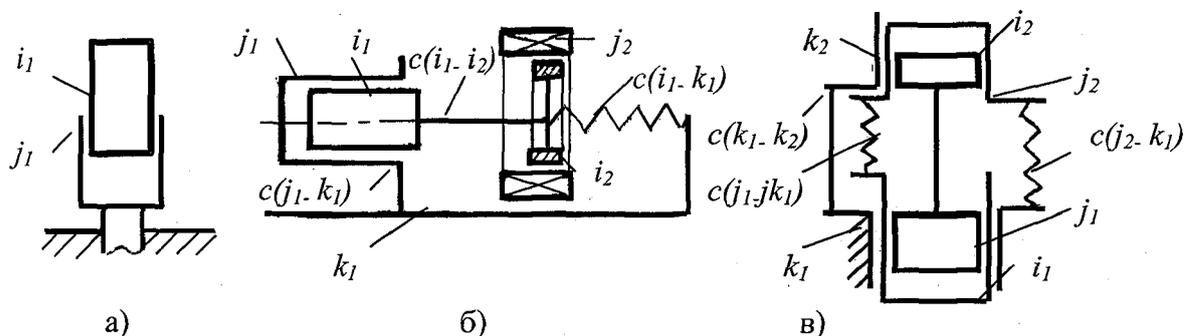


Рис.2.7. Кинематические схемы свободнопоршневых установок с жёсткими и упругими связями

Кинематическая связь высокопроизводительного свайного дизель-молота [1] (рис.2.7.в) содержит поршень i_1 , цилиндр j_1 , корпус k_1 , поршень i_2 , цилиндр j_2 , а также дополнительные связи: жёсткие $c(i_1 - i_2)$, $c(j_1 - k_1)$, $c(k_1 - k_2)$ и упругие $c(j_1 - j_2)$ и $c(j_1 - k_1)$.

Таким образом, преобразование подвижных сочетаний табл.2.14 в механизмы реализуется при помощи исключения ряда элементов и введения дополнительных связей, как между элементами одного радиального, так и двух радиальных соединений.

Конструктивно дополнительные связи могут быть жёсткими, с использованием дополнительных звеньев, в частности шарнирно связанных со звеньями исходных вариантов табл.2.14, и упругими (пружины, демпферы, амортизаторы).

Дополнительные связи снижают степень подвижности соединений табл.2.14 до требуемых по техническому заданию, а также расширяют возможность совершенствования известных образцов.

2.2. Развитие теории векторных модулей

2.2.1. Анализ применимости элементарных модулей в моделях свободнопоршневых механизмов

Результаты исследования структур свободнопоршневых механизмов обеспечивают возможность постановки нетрадиционных задач синтеза механизмов преобразователей энергии. В частности, практический интерес могут представить механизмы, преобразующие возвратно-поступательное движение поршня в однонаправленное вращение выходного вала при сохранении преимуществ свободнопоршневого механизма при отсутствии нормальных нагрузок поршня на цилиндр и кинематической работоспособности при любых степенях сжатия. Имеет практическую ценность даже неполная реализация последнего преимущества, в частности, достижение возможности изменения в широком диапазоне степени сжатия в процессе работы ДВС.

Свободнопоршневой механизм теоретически может быть связан с трансформатором возвратно-поступательного перемещения поршня в однонаправленное вращение выходного вала (рис.2.8). Математические модели механизмов преобразователей движения авиационных поршневых двигателей можно компоновать из четырёх элементарных плоских и девятнадцати пространственных стандартных векторных контуров (модулей), отображая звенья механизмов векторами [35, 68].

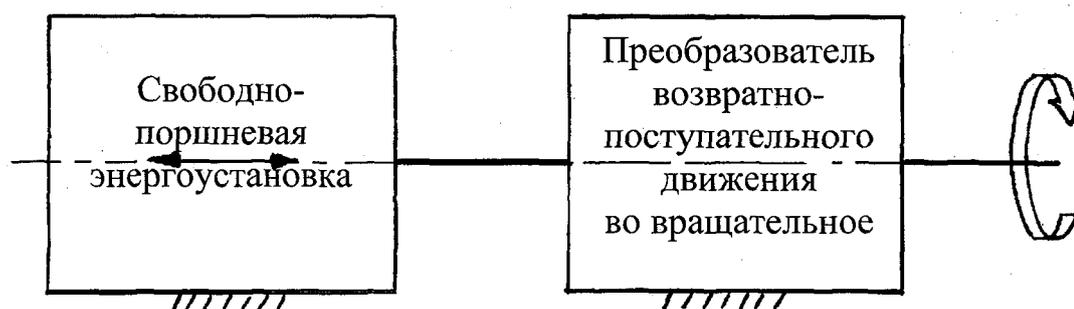


Рис.2.8. Связь свободнопоршневой энергоустановки с механизмом преобразования возвратно-поступательного движения поршня в однонаправленное вращение выходного вала

Модуль векторной модели контурной системы - один или система взаимосвязанных векторных контуров минимального состава с определённой между функциями и аргументами. Элементарные векторные модули - одноконтурные, без дополнительных внутриконтурных связей - наиболее простые из многообразия векторных модулей.

Условие замкнутости плоского (рис.2.9а) m -векторного контура, позволяет определить два любых неизвестных его параметра.

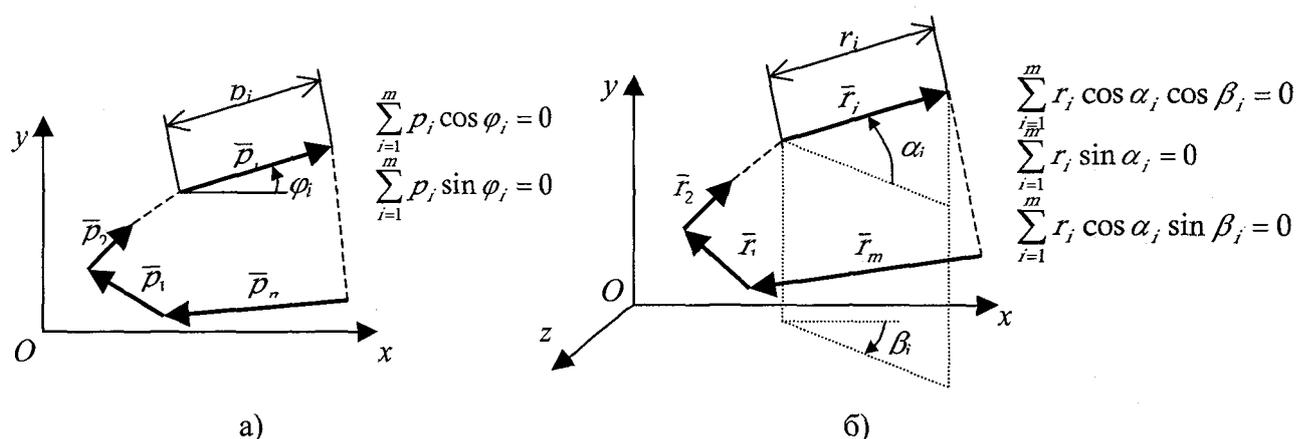


Рис.2.9. Условия замкнутости плоского (а) и пространственного (б) векторного контура

\bar{p}_m, \bar{r}_m - вектора плоского и пространственного контуров;

$\varphi_i, \alpha_i, \beta_i$ - углы между координатными осями и векторами

Абстрактные векторные модули [68] используются при создании математических моделей различных по составу и назначению плоских и пространственных механизмов. В настоящее время практическое применение получили элементарные плоские модули (табл.2.15), имеющие аналитическое и программное обеспечение [68].

Таблица 2.15

Элементарные плоские одноаргументные модули

Модуль	Функции	Макс. число решений	Основные аргументы					
			p_i	φ_i	p_j	φ_j	p_k	φ_k
Пл1	p_i, φ_j	1			x	x		
Пл2	p_i, p_j	1		x		x	x	x
Пл3	p_i, φ_j	2		x	x		x	x
Пл4	φ_i, φ_j	2	x		x		x	x

p - вектор контура; φ - угол между осью абсцисс и вектором; i, j, k - номера векторов

Основными задачами исследования векторных модулей можно считать определение функций и их частных производных первого и второго порядков. Наиболее сложным является поиск решений для функций, связанных системами тригонометрических уравнений. Формулы частных производных для основных одноаргументных модулей после определения значений функций могут быть получены из систем линейных уравнений [68].

Для функций модулей табл.2.15 получены прямые аналитические решения (табл.2.16).

Таблица 2.16

Определение функций элементарных плоских модулей

<p>Пл1 (p, φ_1) $X = \sum_{i=2}^m p_i \cos \varphi_i = 0,$</p> <p>$Y = \sum_{i=2}^m p_i \sin \varphi_i = 0,$</p> <p>$p_1 = \sqrt{X^2 + Y^2},$</p> <p>$\varphi_1 = \text{sign}(-Y) \cdot \arccos(-X / p_1).$</p>	<p>Пл3 (p, p_2) $X = \sum_{i=3}^m p_i \cos(\varphi_i - \varphi_2) = 0,$</p> <p>$Y = \sum_{i=3}^m p_i \sin(\varphi_i - \varphi_2) = 0,$</p> <p>$p_1 = -Y / \sin(\varphi_i - \varphi_2),$</p> <p>$\varphi_1 = -X - p_1 \cos(\varphi_i - \varphi_2).$</p>
<p>Пл2 (p, φ_2) $X = \sum_{i=3}^m p_i \cos(\varphi_i - \varphi_1) = 0,$</p> <p>$Y = \sum_{i=3}^m p_i \sin(\varphi_i - \varphi_2) = 0,$</p> <p>$\Delta p = \sqrt{p_2^2 + Y^2},$</p> <p>При $V = 1$ $k=1$, при $V = 2$ $k = 1$</p> <p>$p_1 = -X + k \cdot p,$</p> <p>$\varphi_2 = \text{sign}(-Y) \cdot \arccos(-k \cdot \Delta p / p_2) + \varphi_1.$</p>	<p>Пл4 (φ, φ_2) $X = \sum_{i=3}^m p_i \cos \varphi_i = 0,$</p> <p>$Y = \sum_{i=3}^m p_i \sin \varphi_i = 0,$</p> <p>$p_{1-2} = \sqrt{X^2 + Y^2},$</p> <p>$\varphi_{1-2} = \text{sign}(-Y) \cdot \arccos(-X / p_{1-2}),$</p> <p>$p = 0,5(p_1 + p_2 + p_{1-2}), \quad s = p / p_{1-2},$</p> <p>При $V = 1$ $k=1$, при $V = 2$ $k = -1,$</p> <p>$\varphi_1 = \varphi_{1-2} + 2k \cdot \arccos \sqrt{s(p - p_1) / p_2}$</p> <p>$\varphi_2 = \varphi_{1-2} - 2k \cdot \arccos \sqrt{s(p - p_2) / p_1}$</p>
<p>$-\pi < \varphi_i < \pi$</p> <p>$V = 1$ или 2 - вариант решения</p>	

Принципиальной особенностью полученных решений следует считать определение не углов геометрических фигур, в частности треугольников, обра-

зованных векторами, а угловых параметров векторов контура в принятой расчётной системе координат.

Пространственные элементарные векторные модули (рис.2.9б) отличаются большим многообразием как вариантов списков функций, так и чисел максимально возможных решений (табл.2.17).

Таблица 2.17

Элементарные пространственные одноаргументные модули

Модуль	Функции	Макс. число решений	Основные аргументы											
			r_i	α_i	β_i	r_j	α_j	β_j	r_k	α_k	β_k	r_l	α_l	β_l
Пр1	r_i, α_i, β_i	1				x	x	x						
Пр2	r_i, α_i, r_j	1			x		x	x	x	x	x			
Пр3	r_i, α_i, α_j	2			x	x		x	x	x	x			
Пр4	r_i, α_i, β_j	2			x	x	x		x	x	x			
Пр5	r_i, β_i, r_j	2		x	x		x	x	x	x	x			
Пр6	r_i, β_i, α_j	4		x	x	x		x	x	x	x			
Пр7	r_i, β_i, β_j	2		x	x	x	x		x	x	x			
Пр8	α_i, β_i, r_j	2	x				x	x	x	x	x			
Пр9	$\alpha_i, \beta_i, \alpha_j$	2	x			x		x	x	x	x			
Пр10	$\alpha_i, \beta_i, \beta_j$	2	x			x	x		x	x	x			
Пр11	r_i, r_j, r_k	1		x	x							x	x	x
Пр12	r_i, r_j, α_k	2		x	x				x		x	x	x	x
Пр13	r_i, r_j, β_k	2		x	x				x	x		x	x	x
Пр14	r_i, α_j, α_k	4		x	x	x		x				x	x	x
Пр15	r_i, α_j, β_k	4		x	x	x		x	x	x		x	x	x
Пр16	$\alpha_i, \alpha_j, \alpha_k$	8	x		x							x	x	x
Пр17	$\alpha_i, \alpha_j, \beta_k$	8	x		x				x	x		x	x	x
Пр18	β_i, β_j, r_k	2	x	x						x	x	x	x	x
Пр19	$\beta_i, \beta_j, \alpha_k$	4	x	x					x		x	x	x	x
Пр20	$\beta_i, \beta_j, \beta_k$	∞	x	x					x	x		x	x	x

r , - вектор контура; β , α -углы между осями координат и векторами; i, j, k, l - номера векторов

- пространственные модули, не имеющие прямых аналитических решений

Пространственные элементарные модули до настоящего времени имели отлаженное аналитическое обеспечение лишь для ограниченного множества. Для модулей Пр6, Пр14 и Пр15, максимальное число решений которых равно четырём, и модулей Пр16, Пр17, максимальное число решений которых равно восьми, поиск прямых аналитических решений задачи о положениях методом Гаусса приводил к необходимости решения тригонометрических уравнений соответственно четвёртой и восьмой степени [17].

При поиске перспективных механизмов преобразования возвратно-поступательного во вращательное движение, в общем случае, практический интерес представляют пространственные модули, не имевшие до настоящего времени прямых аналитических решений (в том числе и для механизма, показанного на рис.2.10). Последнее обстоятельство определило необходимость дальнейшего углублённого исследования аналитики этих модулей.

Прямые аналитические решения, полученные для всех плоских и пространственных элементарных модулей, определяют не только функции, но и их частные производные первого и второго порядка. Эти решения, имеющие программное обеспечение, составляют основу как кинематических так и динамических моделей механизмов.

Предложен оригинальный вариант ДВС [24] с поршнем, совершающим вращательно-поступательное перемещение, допускающее возможность управления изменением степени сжатия (рис.2.10).

Эскизный проект предлагаемого двигателя убеждает в целесообразности его практической реализации. Оценка технических возможностей потребовала создание математической модели механизма двигателя. Наибольший практический интерес для оценки возможностей

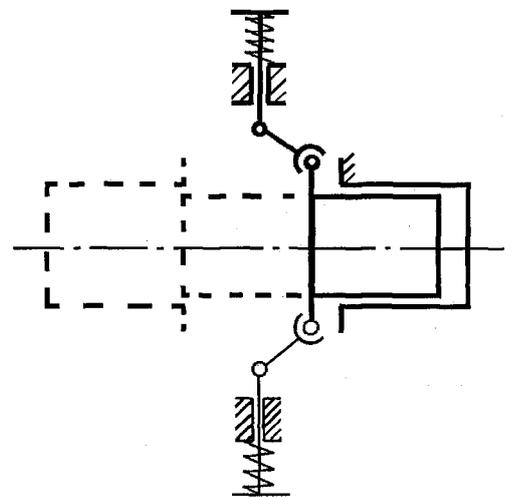


Рис.2.10. Механизм преобразования возвратно-поступательного движения поршня СМП в однонаправленное вращение

различных вариантов конструкции представляет его расчётная кинематическая схема (рис.2.11а) и основная кинематическая модульная модель (рис.2.11б), соответствующая модулю Пр14, с параметрической формулой рис.2.11в.

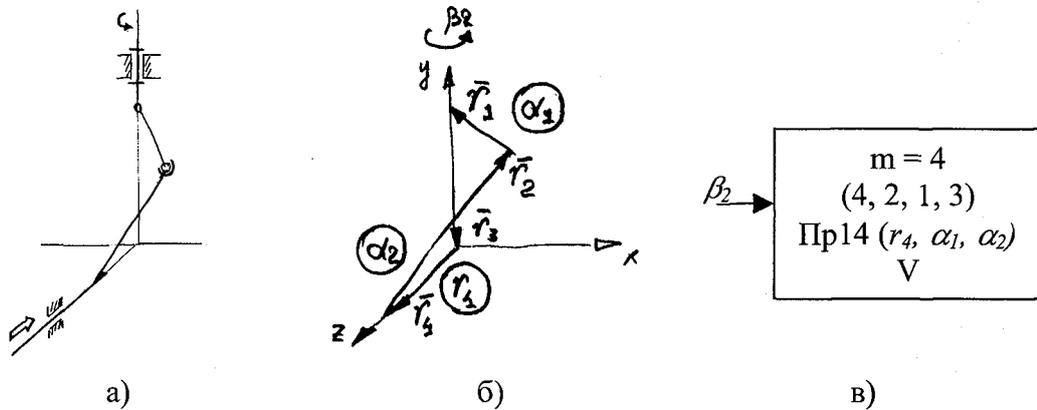


Рис.2.11. Кинематическая модель механизма (а) и его модульная (б) и параметрическая модели

Как видно из рис.2.11в кинематической модели механизма (рис.2.10) соответствует пространственный модуль Пр14 (рис.2.11в), для которого до настоящего времени не существовало прямых аналитических решений.

2.2.2. Применение метода обращения для модулей Пр6 и Пр14-17

Для решения практических задач анализа и синтеза пространственных механизмов рационально использование специальных приёмов, исключающих необходимость решения уравнений высоких степеней.

Используем метод обращения для пространственных модулей Пр6, Пр14-Пр17: принимаем одну из функций - u_1, u_2 или u_3 исходного модуля в качестве аргумента \bar{x} обращённого, а аргумент x исходного - в качестве функции \bar{u} обращённого модуля.

Эффективное обращение модуля - переход от исходного модуля к модулю, имеющему прямые аналитические решения. Для большинства обращённых модулей использованы полученные ранее прямые аналитические решения для модулей Пр1-Пр5, Пр7-Пр13, Пр18 и Пр19 табл.2.16.

В таблицах 2.18-2.22 приведены варианты обращений одноаргументных пространственных модулей Пр6, Пр14-Пр17.

Таблица 2.18

Варианты обращений одноаргументного элементарного
пространственного модуля Пр6

Исходный модуль		Обращённые модули								
Аргумент x	Функции u_1, u_2, u_3	Вариант обращения 1: $\overline{x} = \overline{x}(u_1); \overline{u_1} = \overline{u_1}(x)$			Вариант обращения 2: $\overline{x} = \overline{x}(u_2); \overline{u_2} = \overline{u_2}(x)$			Вариант обращения 3: $\overline{x} = \overline{x}(u_3); \overline{u_3} = \overline{u_3}(x)$		
		\overline{x}	$\overline{u_1}, \overline{u_2}, \overline{u_3}$	Модуль	\overline{x}	$\overline{u_1}, \overline{u_2}, \overline{u_3}$	Модуль	\overline{x}	$\overline{u_1}, \overline{u_2}, \overline{u_3}$	Модуль
α_i	r_i, β_i, α_j	αr_i	$\alpha_i, \beta_i, \alpha_j$	Пр9	β_i	r_i, α_i, α_j	Пр3	α_j	r_i, β_i, α_i	Пр1
r_j			r_j, β_i, α_j	Пр4		r_i, r_j, α_j	Пр2		r_i, β_i, r_j	Пр5
β_j			$\beta_j, \beta_i, \alpha_j$	Пр10		r_i, β_j, α_j	Пр8		r_i, β_i, β_j	Пр7
r_k			r_k, β_i, α_j	Пр15*		r_i, r_k, α_j	Пр12		r_i, β_i, r_k	Пр5
α_k			$\alpha_k, \beta_i, \alpha_j$	Пр17*		r_i, α_k, α_j	Пр14*		r_i, β_i, α_k	Пр6*
β_k			$\beta_k, \beta_i, \alpha_j$	Пр19		r_i, β_k, α_j	Пр15*		r_i, β_i, β_k	Пр7

* - не имеет эффективного обращения

Таблица 2.19

Варианты обращений одноаргументного элементарного
пространственного модуля Пр14

Исходный модуль		Обращённые модули								
Аргумент x	Функции u_1, u_2, u_3	Вариант обращения 1: $\overline{x} = \overline{x}(u_1); \overline{u_1} = \overline{u_1}(x)$			Вариант обращения 2: $\overline{x} = \overline{x}(u_2); \overline{u_2} = \overline{u_2}(x)$			Вариант обращения 3: $\overline{x} = \overline{x}(u_3); \overline{u_3} = \overline{u_3}(x)$		
		\overline{x}	$\overline{u_1}, \overline{u_2}, \overline{u_3}$	Модуль	\overline{x}	$\overline{u_1}, \overline{u_2}, \overline{u_3}$	Модуль	\overline{x}	$\overline{u_1}, \overline{u_2}, \overline{u_3}$	Модуль
α_i	r_i, α_j, α_k	r_i	$\alpha_i, \alpha_j, \alpha_k$	Пр16*	α_j	r_i, α_i, α_k	Пр3	α_k	r_i, α_j, α_i	Пр3
β_i			$\beta_i, \alpha_j, \alpha_k$	Пр17*		r_i, β_i, α_k	Пр6*		r_i, α_j, β_i	Пр6*
r_j			r_j, α_j, α_k	Пр3		r_i, r_j, α_k	Пр12		r_i, α_j, r_j	Пр2
β_j			$\beta_j, \alpha_j, \alpha_k$	Пр9		r_i, β_j, α_k	Пр15*		r_i, α_j, β_j	Пр8
r_k			r_k, α_j, α_k	Пр19		r_i, r_k, α_k	Пр2		r_i, α_j, r_k	Пр12
β_k			$\beta_k, \alpha_j, \alpha_k$	Пр9		r_i, β_k, α_k	Пр8		r_i, α_j, β_k	Пр15*
r_l			r_l, α_j, α_k	Пр14*		r_i, r_l, α_k	Пр12		r_i, α_j, r_l	Пр12
α_l			$\alpha_l, \alpha_j, \alpha_k$	Пр16*		r_i, α_l, α_k	Пр14*		r_i, α_j, α_l	Пр14*
β_l			$\beta_l, \alpha_j, \alpha_k$	Пр17*		r_i, β_l, α_k	Пр15*		r_i, α_j, β_l	Пр15*

* - не имеет эффективного обращения

Таблица 2.20

Варианты обращений одноаргументного элементарного
пространственного модуля Пр15

Исходный модуль		Обращённые модули								
Аргумент x	Функции u_1, u_2, u_3	Вариант обращения 1: $\overline{x} = \overline{x}(u_1); \overline{u_1} = \overline{u_1}(x)$			Вариант обращения 2: $\overline{x} = \overline{x}(u_2); \overline{u_2} = \overline{u_2}(x)$			Вариант обращения 3: $\overline{x} = \overline{x}(u_3); \overline{u_3} = \overline{u_3}(x)$		
		\overline{x}	$\overline{u_1}, \overline{u_2}, \overline{u_3}$	Модуль	\overline{x}	$\overline{u_1}, \overline{u_2}, \overline{u_3}$	Модуль	\overline{x}	$\overline{u_1}, \overline{u_2}, \overline{u_3}$	Модуль
α_i	r_i, α_j, β_k	r_i	$\alpha_i, \alpha_j, \beta_k$	Пр17*	α_j	r_i, α_i, β_k	Пр4	β_k	r_i, α_j, α_i	Пр3
β_i			$\beta_i, \alpha_j, \beta_k$	Пр19		r_i, β_i, β_k	Пр7		r_i, α_j, β_i	Пр16*
r_j			r_j, α_j, β_k	Пр15*		r_i, r_j, β_k	Пр13		r_i, α_j, r_j	Пр2
β_j			$\beta_j, \alpha_j, \beta_k$	Пр10		r_i, β_j, β_k	Пр18		r_i, α_j, β_j	Пр8
r_k			$r_{i_k}, \alpha_j, \beta_k$	Пр6*		r_i, r_{i_k}, β_k	Пр5		r_i, α_j, r_k	Пр12
α_k			$\alpha_{i_k}, \alpha_j, \beta_k$	Пр9		$r_i, \alpha_{i_k}, \beta_k$	Пр8		r_i, α_j, α_k	Пр16*
r_l			r_l, α_j, β_k	Пр15*		r_i, r_l, β_k	Пр13		r_i, α_j, r_l	Пр12
α_l			$\alpha_l, \alpha_j, \beta_k$	Пр17*		r_i, α_l, β_k	Пр15*		r_i, α_j, α_l	Пр14*
β_l			$\beta_l, \alpha_j, \alpha_k$	Пр17*		r_i, β_l, β_k	Пр18		r_i, α_j, β_l	Пр15*

* - не имеет эффективного обращения

Таблица 2.21

Варианты обращений одноаргументного элементарного
пространственного модуля Пр16

Исходный модуль		Обращённые модули								
Аргумент x	Функции u_1, u_2, u_3	Вариант обращения 1: $\overline{x} = \overline{x}(u_1); \overline{u_1} = \overline{u_1}(x)$			Вариант обращения 2: $\overline{x} = \overline{x}(u_2); \overline{u_2} = \overline{u_2}(x)$			Вариант обращения 3: $\overline{x} = \overline{x}(u_3); \overline{u_3} = \overline{u_3}(x)$		
		\overline{x}	$\overline{u_1}, \overline{u_2}, \overline{u_3}$	Модуль	\overline{x}	$\overline{u_1}, \overline{u_2}, \overline{u_3}$	Модуль	\overline{x}	$\overline{u_1}, \overline{u_2}, \overline{u_3}$	Модуль
r_i	$\alpha_i, \alpha_j, \alpha_k$	α_i	r_i, α_j, α_k	Пр14*	α_j	α_i, r_i, α_k	Пр3	α_k	α_i, α_j, r_i	Пр3
β_i			$\beta_i, \alpha_j, \alpha_k$	Пр17*		$\alpha_i, \beta_i, \alpha_k$	Пр16*		$\alpha_i, \alpha_j, \beta_i$	Пр9
r_j			r_j, α_j, α_k	Пр3		α_i, r_j, α_k	Пр14*		α_i, α_j, r_j	Пр3
β_j			$\beta_j, \alpha_j, \alpha_k$	Пр9		$\alpha_i, \beta_j, \alpha_k$	Пр17*		$\alpha_i, \alpha_j, \beta_j$	Пр9
r_k			$r_{i_k}, \alpha_j, \alpha_k$	Пр3		$\alpha_i, r_{i_k}, \alpha_k$	Пр3		α_i, α_j, r_k	Пр14*
β_k			$\beta_{i_k}, \alpha_j, \alpha_k$	Пр6*		$\alpha_i, \beta_{i_k}, \alpha_k$	Пр17*		$\alpha_i, \alpha_j, \beta_k$	Пр17*
r_l			r_l, α_j, α_k	Пр14*		α_i, r_l, α_k	Пр14*		α_i, α_j, r_l	Пр14*
α_l			$\alpha_l, \alpha_j, \alpha_k$	Пр16*		$\alpha_i, \alpha_l, \alpha_k$	Пр16*		$\alpha_i, \alpha_j, \alpha_l$	Пр16*
β_l			$\beta_l, \alpha_j, \alpha_k$	Пр17*		$\alpha_i, \beta_l, \alpha_k$	Пр17*		$\alpha_i, \alpha_j, \beta_l$	Пр17*

* - не имеет эффективного обращения

Таблица 2.22

Варианты обращений одноаргументного элементарного
пространственного модуля Пр17

Исходный модуль		Обращённые модули								
Аргумент x	Функции u_1, u_2, u_3	Вариант обращения 1: $\overline{x} = \overline{x}(u_1); \overline{u_1} = \overline{u_1}(x)$			Вариант обращения 2: $\overline{x} = \overline{x}(u_2); \overline{u_2} = \overline{u_2}(x)$			Вариант обращения 3: $\overline{x} = \overline{x}(u_3); \overline{u_3} = \overline{u_3}(x)$		
		\overline{x}	$\overline{u_1}, \overline{u_2}, \overline{u_3}$	Модуль	\overline{x}	$\overline{u_1}, \overline{u_2}, \overline{u_3}$	Модуль	\overline{x}	$\overline{u_1}, \overline{u_2}, \overline{u_3}$	Модуль
r_i	$\alpha_i, \alpha_j, \beta_k$	α_i	r_i, α_j, β_k	Пр15*	α_j	α_i, r_i, β_k	Пр15*	β_k	α_i, α_j, r_i	Пр3
β_i			$\beta_i, \alpha_j, \beta_k$	Пр19		$\alpha_i, \beta_i, \beta_k$	Пр10		$\alpha_i, \alpha_j, \beta_i$	Пр9
r_j			r_j, α_j, β_k	Пр4		α_i, r_j, β_k	Пр15*		α_i, α_j, r_j	Пр3
β_j			$\beta_j, \alpha_j, \beta_k$	Пр10		$\alpha_i, \beta_j, \beta_k$	Пр19		$\alpha_i, \alpha_j, \beta_j$	Пр9
r_k			r_k, α_j, β_k	Пр6*		α_i, r_k, β_k	Пр6*		α_i, α_j, r_k	Пр14*
α_k			$\alpha_k, \alpha_j, \beta_k$	Пр9		$\alpha_i, \alpha_k, \beta_k$	Пр9		$\alpha_i, \alpha_j, \alpha_k$	Пр16*
r_l			r_l, α_j, β_k	Пр15*		α_i, r_l, β_k	Пр15*		α_i, α_j, r_l	Пр14*
α_l			$\alpha_l, \alpha_j, \beta_k$	Пр17*		$\alpha_i, \alpha_l, \beta_k$	Пр17*		$\alpha_i, \alpha_j, \alpha_l$	Пр16*
β_l			$\beta_l, \alpha_j, \beta_k$	Пр19		$\alpha_i, \beta_l, \beta_k$	Пр19		$\alpha_i, \alpha_j, \beta_l$	Пр17*

* - не имеет эффективного обращения

Анализ вариантов обращения пространственных модулей, приведённых в табл.2.18-2.22, показывает возможность получения аналитических решений задач о функциях для большинства одноаргументных модулей Пр6, Пр14, Пр15, Пр16 и Пр17.

Модуль Пр6 при аргументах α_i, r_i и β_j имеет по три варианта эффективного обращения, при аргументах r_k и β_k - по два варианта, а при аргументе α_k обращение не приводит к желаемому результату, т.к. для полученных в этих случаях обращённых модулей отсутствуют прямые аналитические решения задачи о функциях (табл.2.18).

Модуль Пр14 при аргументах r_j, r_k имеет по три варианта обращения, при аргументах $\alpha_i, \beta_j, \beta_k$ и r_l - по два варианта, а при аргументах $\beta_i, \alpha_l, \beta_l$ обращение не приводит к желаемому результату (табл.2.19).

Модуль Пр15 при аргументе β_j имеет по три варианта обращения, при аргументах $\alpha_i, \beta_i, r_j, r_k, \alpha_k$ и r_l - по два варианта, при аргументе β_l - один вариант, а при аргументе α_l обращение не приводит к желаемому результату (табл.2.20).

Модуль Пр16 при аргументах r_i , r_j , β_j и r_k имеет по два варианта обращения, при аргументе β_i - один вариант, при аргументах β_k , r_l , α_l и β_l обращение не приводит к желаемому результату (табл.2.21).

Модуль Пр17 при аргументах β_i и β_j имеет по три варианта обращения, при аргументах r_j , α_k и β_l - по два варианта, при аргументе r_i - один вариант, а при аргументах r_k , r_l и α_l обращение не приводит к желаемому результату (табл.2.22).

Таким образом для большинства пространственных одноаргументных модулей, ранее не имевших прямых аналитических решений задачи о функциях, были получены такие решения методом обращения.

2.2.3. Применение метода отображения на плоскости

Прямые аналитические решения для функции пространственных модулей табл.2.17, полученные ранее методом Гаусса [68], несмотря на математическую безупречность, нельзя признать наиболее удобными для дальнейшей программной реализации.

Более рациональным при создании пакета программ следует считать метод отображения пространственных модулей на плоскости [68], при котором после перехода к элементарному плоскому модулю определяется функция последнего и совершается переход к функциям исходного пространственного модуля.

Например, для модуля Пр9 (α_1 , β_1 , α_2) предварительно определяем параметры p_2 , p_3 , φ_3 , p_4 , φ_4 и p_5 , затем функции φ_2 и φ_5 плоского модуля Пл4(φ_2 , φ_5) с последующим определением при $\alpha_2 = \varphi_2$ функций α_1 и β_1 с использованием модуля Пр1 (r_1 , α_1 , β_1) (рис.2.12).

Следует признать, что некоторые одноаргументные пространственные модули, как видно из табл.2.18-2.22, не имеют эффективного обращения, аналитические решения для них следует искать с использованием других подходов.

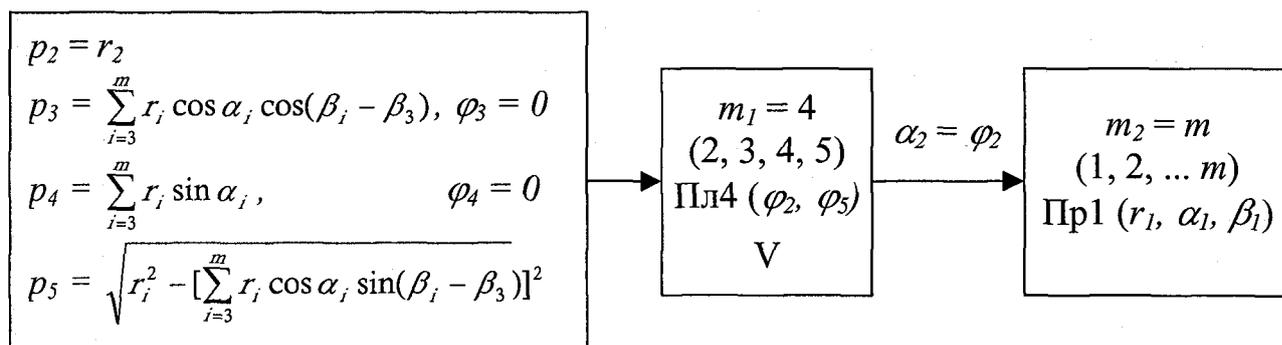


Рис.2.12. Механизм отображения пространственных модулей на плоскости
(на примере пространственного модуля Пр9)

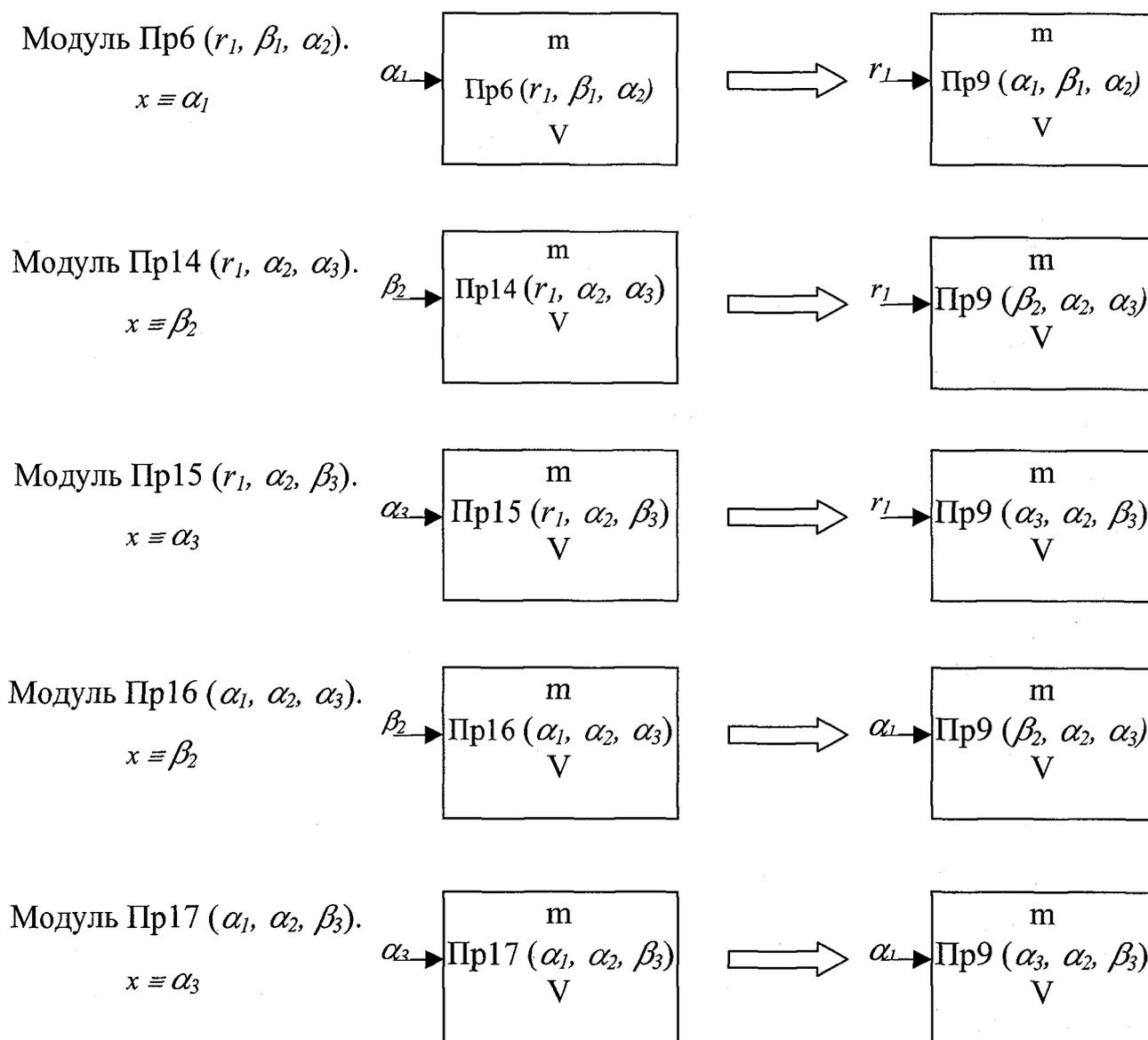


Рис.2.13. Примеры обращения пространственных модулей Пр6, Пр14-17 (для которых не существует прямых аналитических решений) в пространственный модуль Пр9

Для каждого из вариантов обращённых пространственных (Пр6, Пр14-17) модулей можно выполнить переход к пространственному модулю, допускающему отображение на плоскость. К примеру, для пространственного модуля Пр14 (r_1, α_2, α_3) при аргументе β_2 переходим к модулю Пр9 ($\alpha_2, \beta_2, \alpha_3$) (рис.2.13) с последующим использованием известного решения (рис.2.12).

В общем случае, большинство одноаргументных элементарных пространственных модулей допускает эффективное обращение с последующим отображением на плоскости элементарными плоскими модулями.

Таким образом, ядром программного обеспечения элементарных векторных модулей могут быть расчётные блоки для четырёх плоских модулей.

Заключение по второй главе:

1. Получены дополнительные модификации структурно-конструктивных вариантов звена с двумя элементами кинематических пар.
2. Определены структурно-конструктивные формулы осевых, радиальных и смешанных совмещённых подвижных соединений, представляющие практический интерес для структурного синтеза свободнопоршневых механизмов.
3. Обоснована возможность синтеза свободнопоршневого механизма на основе преобразований структурно-конструктивных вариантов совмещённых подвижных соединений звеньев.
4. Показана практическая ценность применения элементарных пространственных модулей при создании кинематических моделей механизмов преобразователей возвратно-поступательного движения во вращательное.
5. Получены аналитические решения для пространственных модулей Пр6, Пр14-Пр17 методом обращения и отображения на плоскости, позволяющие создавать математические модели пространственных механизмов различных авиационных двигателей.

3. РАЗРАБОТКА ОСНОВ МЕТОДИКИ КОМПОЗИЦИИ СВОБОДНОПОРШНЕВЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК

3.1. Обобщённое описание свободнопоршневой энергоустановки

Свободнопоршневые механизмы преобразователей энергии, в общем случае, отличаются большим разнообразием структурных схем (табл.2.11, 2.14) и вариантов конструкторских решений. Для каждого из проектируемых механизмов обычно создаются различные динамические модели, которые в большинстве случаев трудно использовать при внесении изменений в структурную схему механизма [42].

Практическую ценность может представить разработка некоторой общей модели свободнопоршневой энергоустановки, учитывающей всевозможные структурные варианты и взаимосвязи их звеньев. Такая модель представляет интерес как при модификации исследуемого механизма, так и для общего случая поиска новых вариантов энергоустановок летательных аппаратов.

Обобщённая динамическая модель должна учитывать структуру механизма, внешние нагрузки на её звенья и массовые характеристики последних.

Свободнопоршневой механизм может иметь один, два (рис.3.1), а в общем случае и более подвижных звеньев, образующих с корпусом неподвижные кинематические пары.

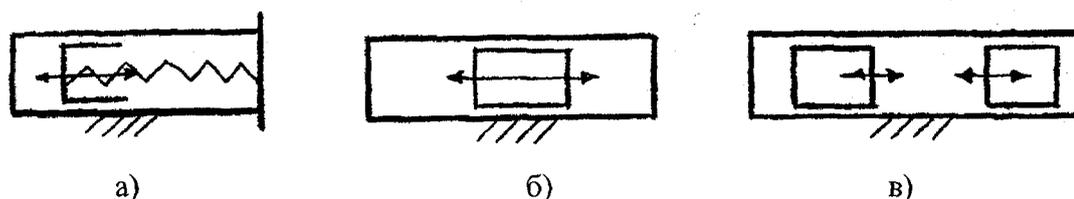


Рис.3.1. Свободнопоршневой механизм с одним (а, б) и двумя (в) подвижными элементами

Наиболее простая свободнопоршневая энергоустановка содержит лишь один поршень, образующий с цилиндром единственную рабочую камеру. Создание более сложных вариантов преобразователей энергии допускают соединение свободнопоршневой энергоустановки с другим преобразователем энергии, например, с компрессором, электрогенератором, гидронасосом и т.д.

Анализ различных по конструкции и назначению свободнопоршневых энергоустановок позволяет предложить их *обобщённую характеристику*:

1. Виды энергии на входе и на выходе
2. Число СПМ, входящих в состав энергоустановки
3. Описание каждого СПМ
4. Описание межконтурных связей
 - 4.1. Число межконтурных связей
 - 4.2. Описание каждой из межконтурных связей
 - 4.2.1. Вид межконтурной связи
 - 4.2.2. Механическая характеристика межконтурной связи

Виды энергии на входе и выходе характеризуют основное назначение исследуемой свободнопоршневой энергоустановки. Например, свободнопоршневой двигатель создаётся для преобразования энергии топлива в механическую энергию, которая идёт на вращение воздушного винта летательного аппарата или для привода колёс транспортного средства. В этом случае, на входе преобразователя имеется тепловая энергия, на выходе - механическая.

Свободнопоршневой компрессор в зависимости от выбора вида энергии на входе может быть создан на основе свободнопоршневого двигателя, линейного электро- или пневмодвигателя и т.д. Гидроамортизатор обеспечивает преобразование кинетической энергии поршня (плунжера) в потенциальную энергию гидросмеси с последующим её рассеиванием, обеспечивающим изменение закона движения поршня.

В общем случае в свободнопоршневых энергоустановках могут реализовываться основные виды преобразования энергии (табл.3.1). Следует отметить, что помимо основных видов преобразования энергии, для которых создаются конкретные механизмы свободнопоршневых энергоустановок, могут реализовываться и другие виды преобразования. Например, свободнопоршневой ДВС может в своём составе иметь и преобразователи энергии механической в электрическую, затем электрической в энергию жидкости под давлением и дальнейший переход её в механическую энергию вращающегося выходного вала.

Преобразование энергии может осуществляться и без изменения её вида, например, в трансформаторе электрической энергии, в механическом редукторе. Подобные преобразователи называют трансформаторами энергии.

Таблица 3.1

Основные виды преобразования энергии

		Вид энергии на входе				
		Мех	Тепл	Электр	Энерг. сжатых газов	Прочие
Вид энергии на выходе	Мех					
	Тепл					
	Электр					
	Энерг. сжатых газов					
	Прочие					

- трансформаторы энергии

Отметим, что в технике используется множество физических эффектов, обеспечивающих преобразование энергии.

Число СПМ, входящих в состав свободнопоршневой энергоустановки, может быть различным. Так в свободнопоршневой генераторе газов (рис.1.16) в состав свободнопоршневой установки входит два свободнопоршневых механизма, каждый из которых представляет собой совмещённое осевое подвижное соединение (табл.2.9).

Теоретически число промежуточных механизмов преобразователей энергии в составе свободнопоршневой энергоустановки может быть неограниченно, однако в реальных конструкциях предпочтительна их минимизация.

3.2. Обобщённое описание свободнопоршневого механизма

Описание каждого СПМ, входящего в состав энергоустановки, содержит сведения не только о его структуре и нагрузках на звенья, но и о массовых характеристиках и конструктивных особенностях последних.

Обобщённое описание СПМ может быть представлено в следующем виде:

1. Вид преобразования энергии
2. Вид и вариант кинематической пары
3. Конструктивные параметры звеньев
4. Массовые характеристики подвижных звеньев
5. Внутриконтурные связи
6. Нагрузки на подвижные звенья

Вид преобразования энергии характеризуется видами энергии на входе и выходе из свободнопоршневого механизма (табл.3.1). В отличие от свободнопоршневой энергоустановки описание СПМ содержит в большинстве случаев единственный вид преобразования энергии.

Вид и вариант кинематической пары содержит сведения о её структуре (вращательная, поступательная или вращательно-поступательная - рис.2.1) и особенностях её конструктивного исполнения (табл.2.1-2.6) (рис.3.2).

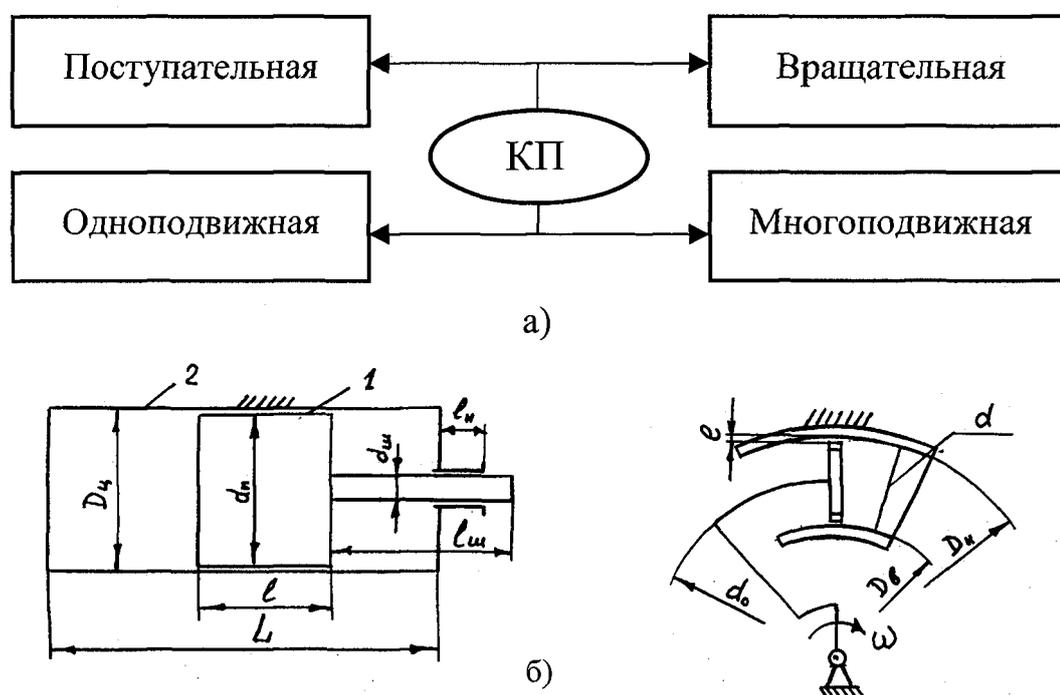


Рис.3.2. Вид кинематической пары (а) и конструктивные параметры звеньев (б) СПМ

Массовые характеристики подвижных звеньев в общем случае содержат сведения о массе, расположении центра масс на звене и о моменте инерции J_s звена относительно центра масс (рис.3.3). В частных случаях, при вращении звена относительно неподвижной точки, достаточно указать величину момента инерции J_s , при поступательном перемещении звена без вращения - указать значение массы m этого звена.

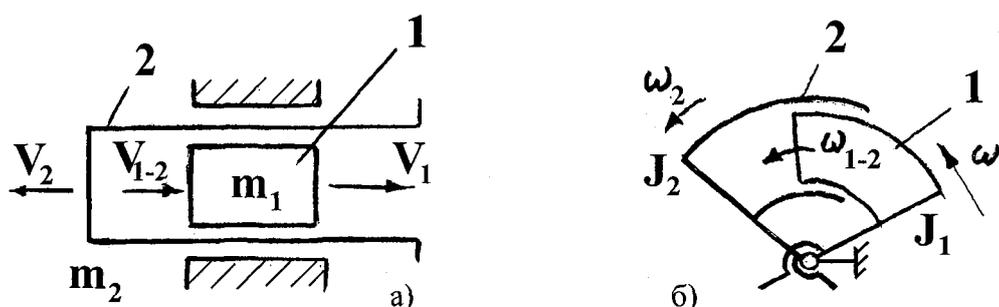


Рис.3.3. Учёт массовых характеристик СПМ при поступательном движении (а) и вращательном движении (б) звеньев

1 - поршень; 2- цилиндр; m - масса звена; V - скорость звена;

J - момент инерции подвижного звена; ω - угловая скорость звена

Решая уравнения движения одномассовых моделей поступательного или вращательного перемещения звеньев (табл.3.2), определяем закон движения свободнопоршневого механизма.

Таблица 3.2

Уравнения движения

Поступательное перемещение:		
I	$F_{\Sigma} - \frac{1}{2} \frac{\partial m_{\Sigma}}{\partial s} \cdot V^2 - m_{\Sigma} a = 0$	$m_1, m_2 - \text{var}$
	$F_{\Sigma} - m_{\Sigma} a = 0$	$m_1, m_2 - \text{const}$
Вращательное перемещение:		
II	$M_{\Sigma} - \frac{1}{2} \frac{\partial J_s}{\partial \varphi} \cdot \omega^2 - J_s \varepsilon = 0$	$J_1, J_2 - \text{var}$
	$M_{\Sigma} - J_s \varepsilon = 0$	$J_1, J_2 - \text{const}$

В состав СПМ могут быть введены и дополнительные жёсткие или упругие *внутриконтурные связи*, например, пружины для возврата поршня в крайнее положение (рис.3.1а). Внутриконтурные связи могут быть реализованы да-

же в простом свободнопоршневом механизме, а в общем случае свободнопоршневые энергоустановки могут иметь широкий набор внутриконтурных связей (рис.3.4), которые необходимо учитывать в динамических моделях.

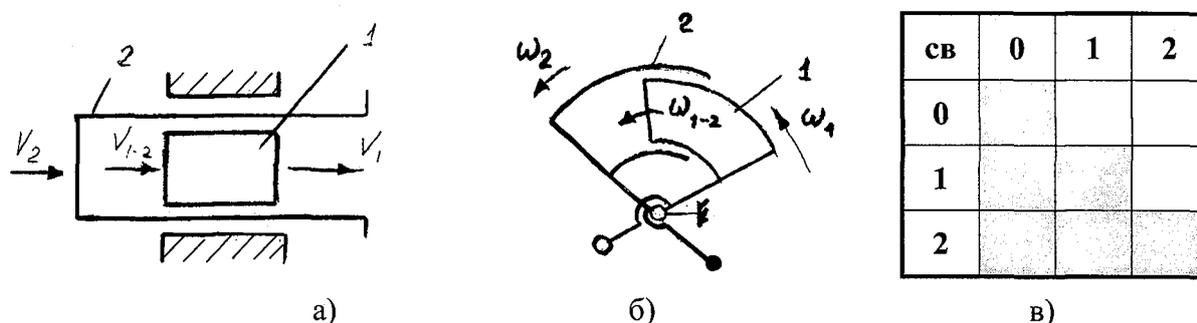


Рис.3.4. Внутриконтурные связи СПМ для поступательного (а) и вращательного (б) движения и варианты возможных связей (в).

1 - поршень; 2- цилиндр; V - скорость звена; ω - угловая скорость звена

На рис.3.4 показаны внутриконтурные связи свободнопоршневого механизма. Как видно из рис.3.4в, для одного СПМ возможны три варианта внутриконтурных связей, для двух же СПМ существует максимум четыре связи между отдельными частями звеньев (рис.3.7).

Нагрузки на подвижные звенья учитывают внешние воздействия изменяющие их кинетическую энергию. По своей физической природе они имеют различное происхождение: силовое воздействие от сосредоточенной или распределённой нагрузки, влияние различных полей - гравитационного, магнитного, акустического и т.д. Нагрузки могут зависеть только от перемещений звеньев, а так же от их скоростей и ускорений.

Особое внимание следует уделить внешним нагрузкам, а именно нагрузкам от сжатия и горения топливовоздушной смеси внутри рабочего цилиндра свободнопоршневой энергоустановки (рис.3.5а) и силам, препятствующим движению магнита-поршня внутри цилиндра-катушки (рис.3.5б). Если характер индикаторной диаграммы ДВС примерно определён и его трудно кординально изменить, то на характер внешних электрических сил оказывает большое влияние качество и количество витков катушки, а так же электрические характеристики магнита (рис.3.5б). Поэтому в динамическую модель заклады-

ваются совершенно разнообразные нагрузочные характеристики и оцениваются их влияние на работу энергоустановки.

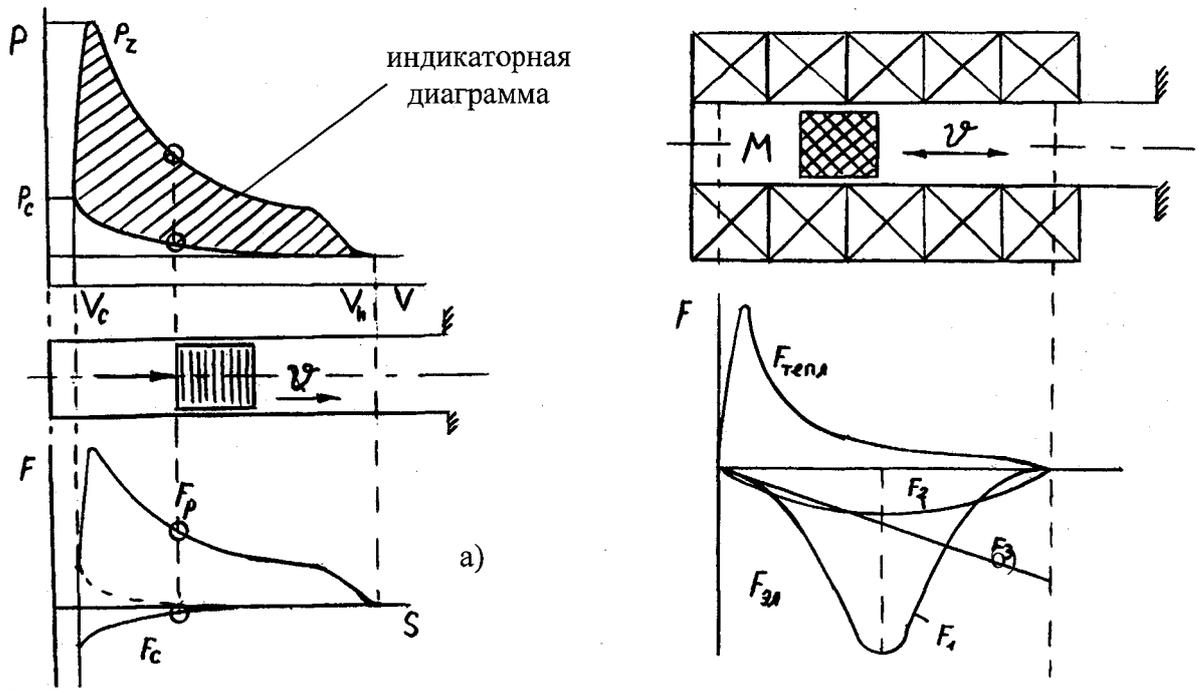


Рис.3.5. Внешние нагрузки, приходящие на поршень свободнопоршневой энергоустановки
 а - силы сжатия (F_c), расширения (F_p) горения топливоздушной смеси
 б - силы сопротивления движению магнита в катушке

То же самое и с нагрузками, приходящими на звенья механизма от внутренних связей этих звеньев, где упругие связи (рис.3.6а), гидросвязи (рис.3.6б), гравитационные нагрузки (рис.3.6в) и др. оказывают своё влияние на работу свободнопоршневой энергоустановки.

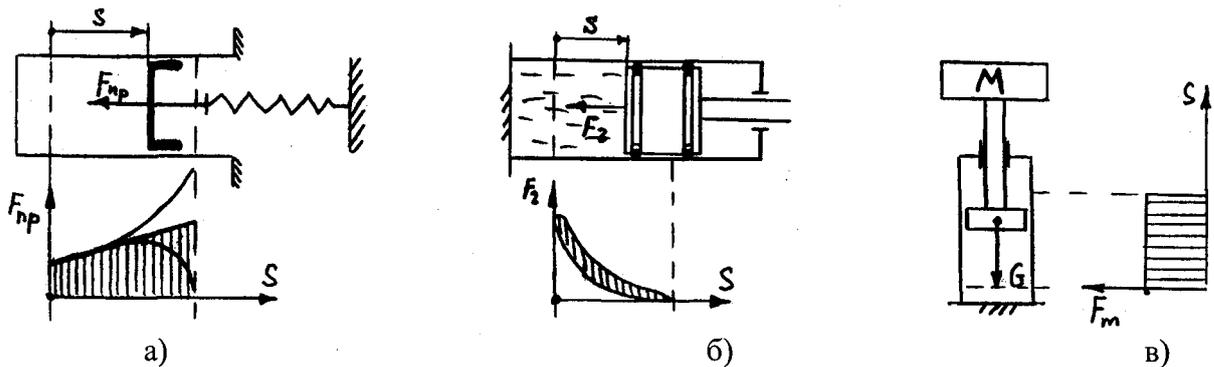


Рис.3.6. Внутренние нагрузки на поршень свободнопоршневой энергоустановки
 а - силы упругости ($F_{уп}$), б - силы давления жидкости ($F_ж$), в - силы тяжести ($F_{тяж}$)

3.3. Аналитическое описание межконтурных связей

Свободнопоршневые энергоустановки могут иметь широкий набор *межконтурных связей* (рис.3.7), которые необходимо учитывать в динамических моделях.

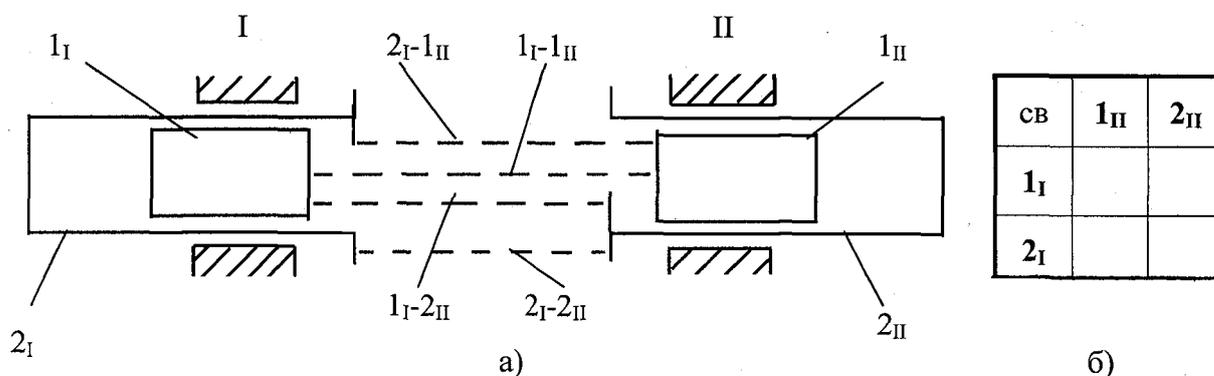


Рис.3.7. Межконтурные связи двух свободнопоршневых механизмов (I и II)

На рис.3.7 показаны межконтурные связи двух свободнопоршневых механизмов. Как видно из рис.3.4, для одного СПМ возможны три варианта внутриконтурных связей, а для двух СПМ существует максимум четыре связи между отдельными частями звеньев (рис.3.4б).

Дополнительные жёсткие и упругие связи могут быть введены и между звеньями различных свободнопоршневых механизмов в составе энергоустановки. На рис.3.8 упругие межконтурные связи 1 выполнены между поршнями, а связи 2 - между корпусами механизмов свободнопоршневых машин объёмного вытеснения А и Б.

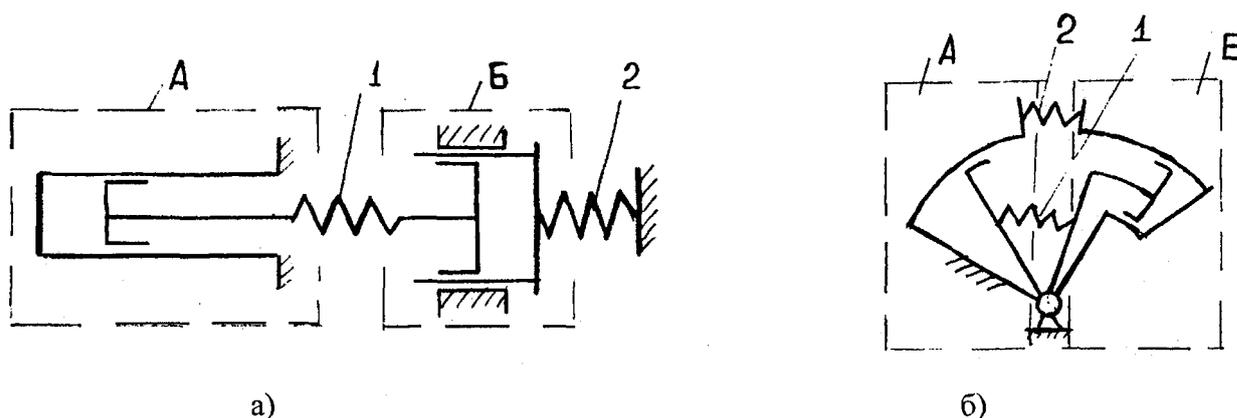


Рис.3.8. Варианты межконтурных связей двух СПМ А и Б

1, 2 - упругие связи

При анализе структуры свободнопоршневой энергоустановки в некоторых случаях рационально создание эквивалентных структурных схем. Например, свободнопоршневую машину, принципиальная схема которой приведена на рис.3.9а, можно представить в виде двух механизмов машин объёмного вытеснения А и Б и линейного электрогенератора В (рис.3.9б).

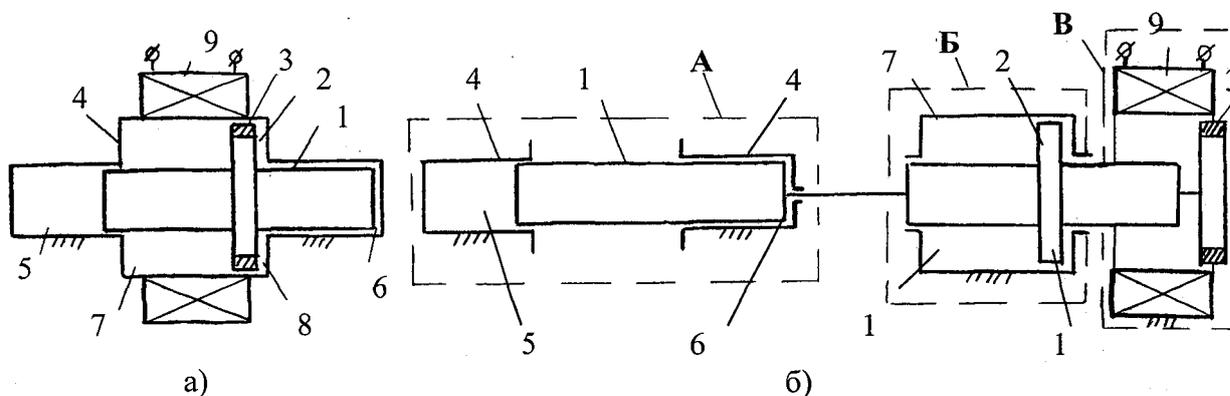
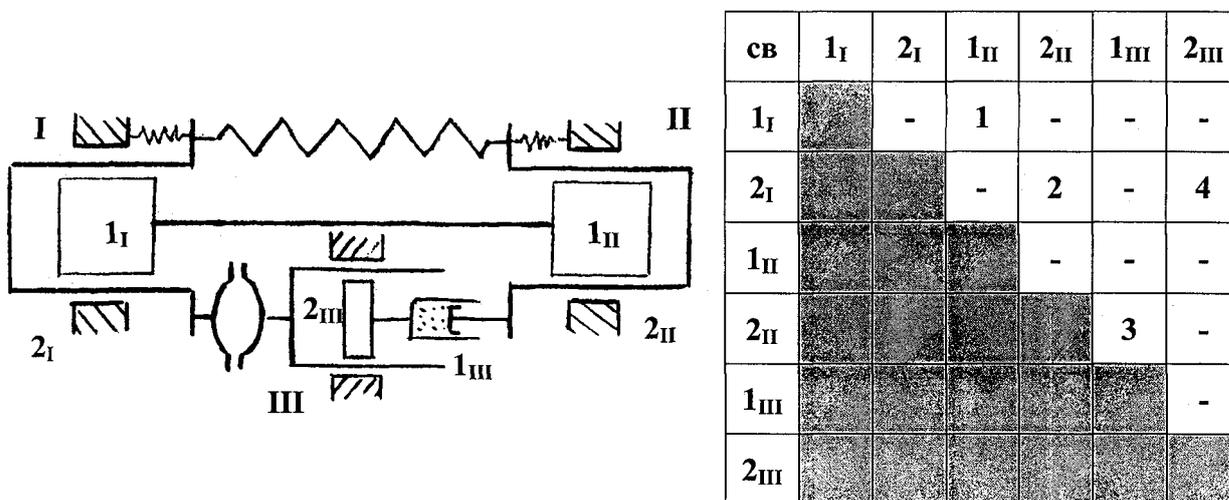


Рис.3.9. Принципиальная схема свободнопоршневой машины (а)

и её эквивалентная схема (б)

Вариант описания структурной схемы свободнопоршневой энергоустановки выбирается в зависимости от назначения проектируемого устройства и конкретной задачи его исследования.

На рис.3.10 приведён пример системы трёх СПМ с вариантами связей - жёсткой, упругой механической, гидросвязью, пневмосвязью (возможны и другие виды связей).



1 - жёсткие связи

2 - упругие механические связи

3 - гидросвязи

4 - пневмосвязи

Рис.3.10. Примеры межконтурных связей трёх СПМ (I,II и III)

3.4. Выбор динамической модели свободнопоршневой энергоустановки

Обобщённая характеристика свободнопоршневой энергоустановки позволяет создавать динамические модели энергоблоков различных принципиальных схем.

Индикаторная диаграмма для каждой из рабочих камер ДВС, диаграммы нагрузок на поршни электрогенераторов и нагрузочные характеристики внутри- и межконтурных связей отличаются большим разнообразием (рис.3.5-3.7) и выбираются в зависимости от постановки конкретной задачи анализа или синтеза исследуемой свободнопоршневой энергоустановки.

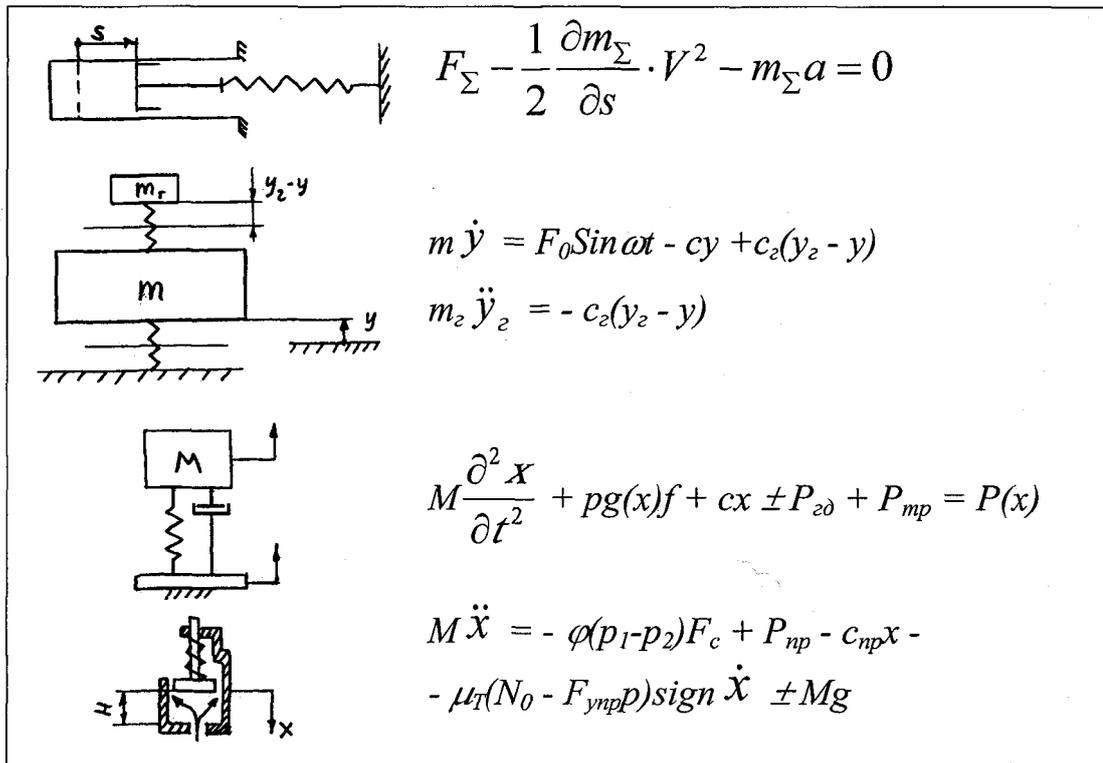
Наиболее простые динамические модели создаются при следующих допущениях:

- нагрузки на подвижные звенья зависят лишь от их положения;
- трением в кинематических парах пренебрегаем.

Обобщённая динамическая модель свободнопоршневой энергоустановки при принятых ограничениях описывается уравнениями движения табл.3.1. Ввиду теоретически неограниченного структурного многообразия межконтурных связей, следует признать эффективным создание на основе частных вариантов обобщённой характеристики динамических моделей банка программ анализа и синтеза структур. При композиции механизмов свободнопоршневых энергоустановок исследовались ранее опробированные динамические модели, созданные при проектировании линейных ДВС и амортизаторов (табл.3.3) [1, 79]. Задачей данного этапа исследования является создание библиотеки структурных схем механизмов (табл.2.8-2.14), представляющих теоретический и практический интерес при поиске перспективных свободнопоршневых линейных энергоблоков.

Таблица 3.3

Многообразие динамических моделей свободнопоршневых установок



Предложены основы методики композиции механизмов свободнопоршневых энергоустановок, этапы которой приведены на рис.3.10.

Композиция механизмов - поиск механизмов с требуемыми функциональными свойствами с учётом принятых ограничений [67].

Особенность предлагаемой методики заключается прежде всего в том, что на начальном этапе не известна структура проектируемого механизма и сначала осуществляется переход от описательной модели к идеальным моделям входного и выходного звеньев, затем - к вариантам математических моделей с последующим анализом их кинематического и динамического совершенства, определяющим выбор наиболее удачных вариантов и отображением их в виде кинематических и принципиальных схем создаваемого механизма.

Разработка технических требований и выбор основной целевой функции (рис.3.10) включает в себя описательную модель свободнопоршневой энергоустановки с требуемыми свойствами, а также идеализацию входного и выходного звеньев (к примеру, входное звено - горение топлива, выходное - электрическая энергия).



Рис.3.10. Методика композиции свободнопоршневых энергоустановок на этапе предэскизного проектирования

Сравнительная оценка динамического совершенства свободнопоршневых энергоустановок на этапе предэскизного проектирования осуществляется по критериям эффективности, таким как КПД энергоустановки, мощность, удельный вес.

Особенность постановки наиболее общей задачи композиции механизма является неопределённость его структурной схемы на начальном этапе. Решение задачи структурного синтеза в этом случае сводится к задаче приближения к целевой функции при выбранных критериях оптимизации.

Достоинством предлагаемой методики является возможность постановки нетрадиционных задач поискового конструирования. Например, получены результаты по композиции свободнопоршневой энергоустановки вращательного движения. Сохранив все преимущества СПМ, обеспечена возможность использования нерегулярного циклического движения поршня при однонаправленном вращении выходного вала генератора.

Инвариантность предлагаемой методики определяется возможностями её применения к свободнопоршневым устройствам различного назначения - энергоблокам и двигателям как летательных аппаратов и наземных транспортных средств, так и к амортизаторам, клапанным системам и другим устройствам.

Заключение по третьей главе:

1. Предложена обобщённая характеристика свободнопоршневого механизма.
2. Предложена обобщённая характеристика свободнопоршневой энергоустановки.
3. Сформулированы подходы к созданию библиотек описаний внешних нагрузок внутри- и межконтурных связей.
4. Определены основные этапы методики композиции свободнопоршневых устройств.

4. КОМПОЗИЦИЯ СВОБОДНОПОРШНЕВЫХ ЭНЕРГООБЛОКОВ

4.1. Особенности работы свободнопоршневого ДВС

Особенности работы свободнопоршневой установки 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 свободнопоршневой установки [53].

История совершенствования ДВС - длительный путь постоянного усложнения систем, обслуживающих термодинамические процессы в камере сгорания машины объёмного вытеснения с кривошипно-ползунным механизмом. В традиционной силовой установке среди нагромождения 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.

Объективной причиной подобного технического постоянства можно считать технологичность основных деталей традиционного механизма ДВС, отвечающего требованиям массового производства.

По этой причине 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 двигателей внутреннего сгорания поколений изобретателей разных стран. Предложения, значительно усложняющие кинематическую схему традиционного основного механизма двигателя, также как и оригиналь-

ные 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.

Свободнопоршневую энергетическую установку можно считать наиболее простой по конструкции и хорошо приспособленной к требованиям массового производства.

Исходя из основного требования, предъявляемого к конструкции свободнопоршневой энергоустановки (простота конструкции, минимум подвижных звеньев), определим подход к выбору её принципиальной схемы [25, 48, 69, 80] - создание свободнопоршневой линейной энергоустановки на базе двухтактного двигателя внутреннего сгорания с двумя рабочими камерами сгорания и одним подвижным поршнем (рис.4.1).

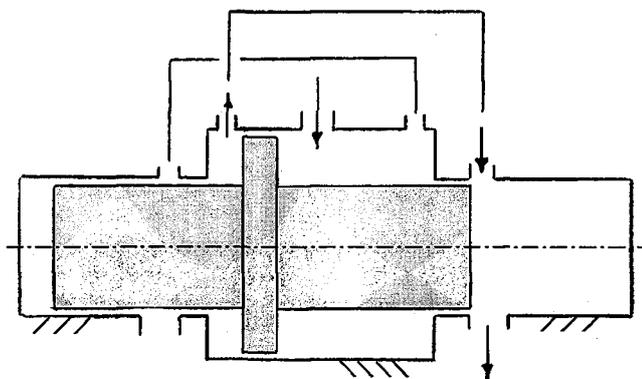


Рис.4.1. Схема простейшей свободнопоршневой энергоустановки на базе двухтактного ДВС с одним поршнем и двумя рабочими камерами

Ниже приведены результаты расчёта (тепловые, кинематические и динамические характеристики [51, 81]) варианта такой свободнопоршневой энергоустановки с эффективной тепловой мощностью $N = 50$ кВт на установившемся режиме. За установившейся режим выбираем работу свободнопоршневой установки при геометрической степени сжатия $\varepsilon = 15$ (действительная степень сжатия - 10,8).

Исходные данные (мощность энергоустановки 50кВт) выбраны, основываясь на характеристиках существующего авиационного двигателя "Rotax-582/40UL DCDI" (приложение 2), для последующей оценки эффективности энергоустановки.

Частоту движения поршня f и другие динамические и теплотехнические характеристики определяем, используя разработанное программное обеспечение (приложение 1), основа которой - уравнение движения

$$F_{\Sigma} - \frac{1}{2} \frac{\partial m_{\Sigma}}{\partial s} \cdot V^2 - m_{\Sigma} a = 0, \quad (4.1)$$

где F_{Σ} - сумма всех сил, действующих на поршень, m_{Σ} - приведённая масса, s - перемещение (ход) поршня, V - скорость поршня, a - ускорение поршня.

В нашем случае (рис.4.1) приведённая масса m_{Σ} , равная массе поршня, не изменяется, поэтому уравнение (4.1) принимает вид:

$$F_{\Sigma} - m_{\Sigma} a = 0. \quad (4.2)$$

Сумма всех сил, действующих на поршень, складывается из газовых сил F_2 и сил торможения поршня F_m :

$$F_{\Sigma} = F_2 + F_m. \quad (4.3)$$

Газовые силы F_2 определяются индикаторной диаграммой энергоустановки. На рис.4.2 представлена индикаторная диаграмма двухтактной свободнопоршневой установки на установившемся режиме, которая была получена, используя известные методики по расчёту рабочих процессов поршневых и комбинированных двигателей [44, 56, 57, 38, 43, 52, 83], на основе которых и было разработано программное обеспечение (приложение 1).

На характер индикаторной диаграммы большое влияние оказывают такие величины как коэффициент остаточных газов и давление топливовоздушной смеси на впуске (табл.4.1).

Анализируя принципиальную схему рис.4.1 (свободнопоршневая установка работает по двухтактному циклу с петлеобразной продувкой) принимаем коэффициент остаточных газов равным 0,2, а давление топливовоздушной смеси на впуске равным давлению окружающей среды [57].

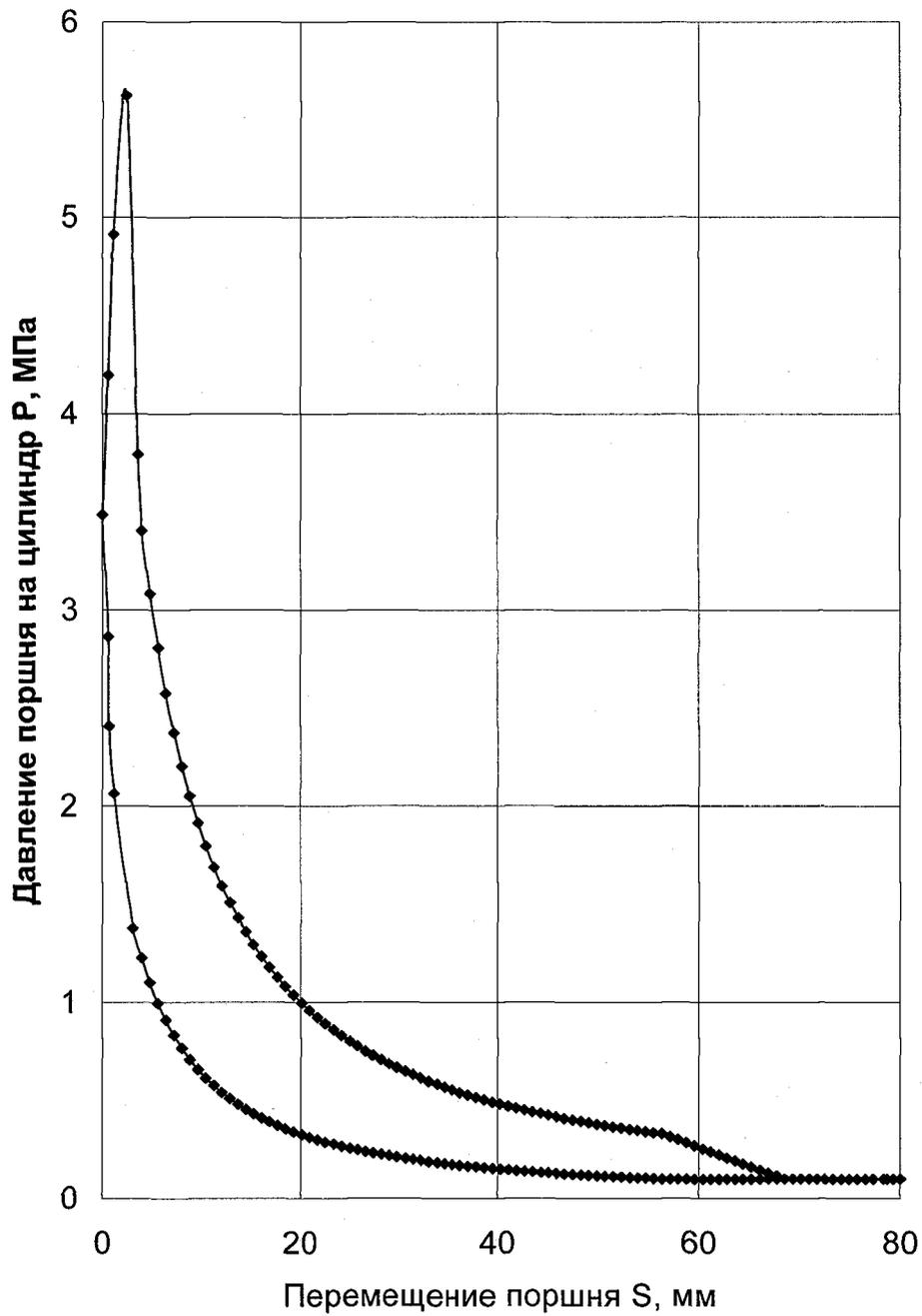


Рис.4.2. Индикаторная диаграмма двухтактной свободнопоршневой установки на установившемся режиме (геометрическая степень сжатия $\varepsilon = 15$)

Преобразуем уравнение (4.2) к следующему виду:

$$a = \frac{F_{\Sigma}}{m_{\Sigma}} \quad (4.4)$$

Как видно из (4.4) ускорение поршня (рис.4.3в) прямо пропорционально силе, действующей на поршень, а следовательно, и давлению на него (рис.4.3а).

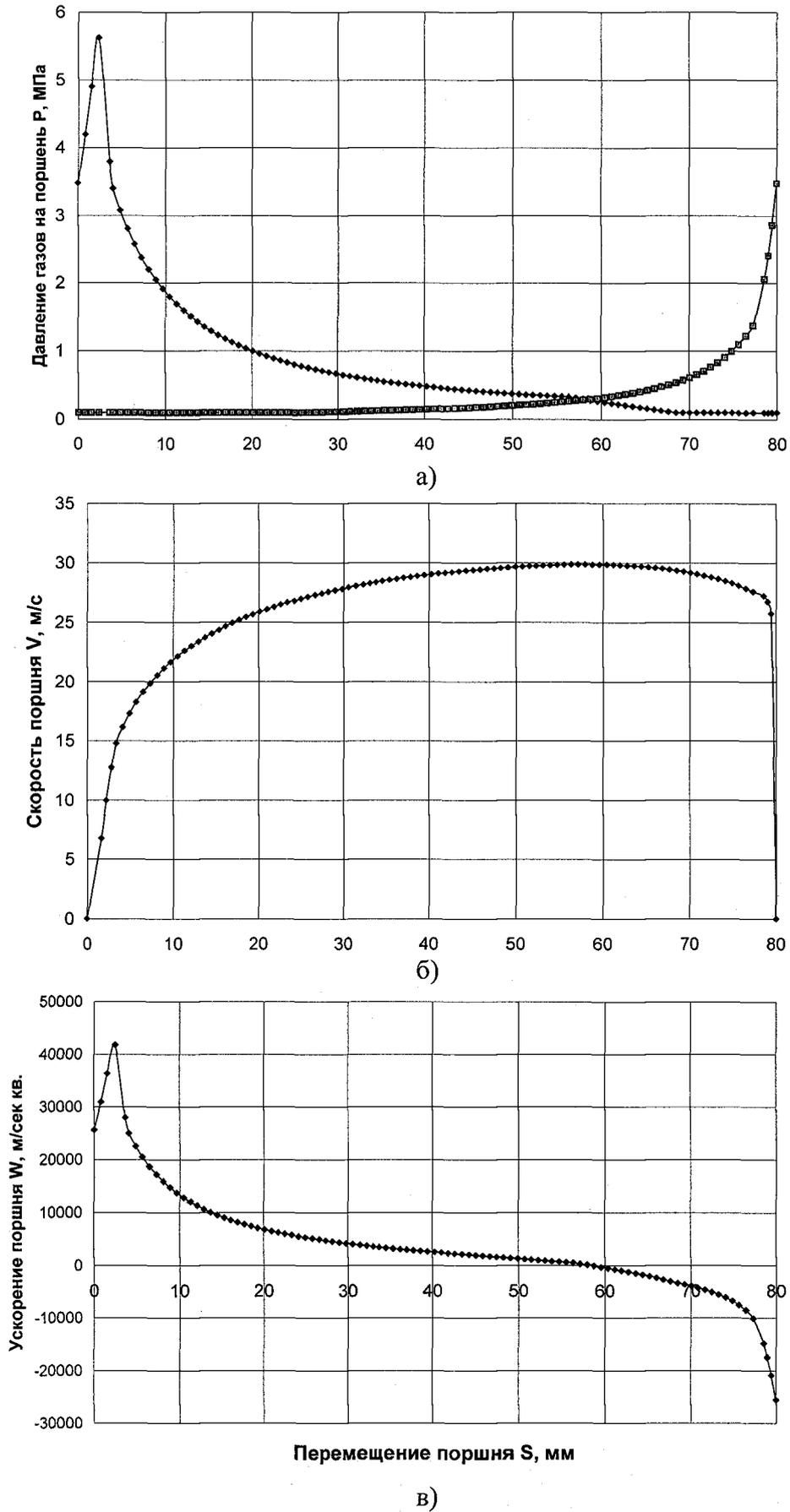


Рис.4.3. Изменение давления в цилиндре (а), скорости (б) и ускорения (в) поршня в зависимости от хода поршня s двухцилиндровой свободнопоршневой энергоустановки

Зная ускорение поршня a , можно определить скорость поршня V_n (рис.4.3б) в любой момент времени, а, следовательно, время T одного цикла и частоту f движения поршня свободнопоршневой энергоустановки.

$$\left. \begin{array}{l} V_n = \frac{ds}{dt} \\ a = \frac{dV_n}{dt} \end{array} \right\} \Rightarrow V_n = \sqrt{2 \int a ds} \quad (4.5)$$

$$T = \int V_n ds, \quad f = \frac{1}{T} \quad (4.6)$$

Определены основные динамические характеристики для свободнопоршневой энергоустановки с общим объёмом цилиндров $V_h = 730 \text{ см}^3$ с частотой движения поршня $f = 8159,8$ циклов/мин и геометрической степенью сжатия $\varepsilon = 15$ (рис.4.3а, б, в).

Как уже говорилось выше, отличительная особенность линейного двигателя - это работоспособность при изменяющейся степени сжатия [22, 47], что, наряду с отсутствием боковых нагрузок поршня на цилиндр, ведёт к повышению эффективного КПД двигателя [30].

В таблице 4.1 приведены основные расчётные теплотехнические характеристики свободнопоршневой энергоустановки. На рис.4.4 показаны зависимости эффективной тепловой мощности N_e , эффективного теплового КПД энергоустановки η_e , часового расхода топлива Gt от частоты движения поршня. На характер кривых рис.4.4 (возрастание мощности и КПД энергоустановки) большое влияние оказывает увеличение степени сжатия ε при увеличении частоты движения поршня f . Незначительное изменение часового расхода топлива Gt (0,115...0,135 кг/час) на разных частотах работы свободнопоршневой установки свидетельствует о высоких показателях энергоустановки, и связано это с увеличением степени сжатия и КПД. Так при увеличении частоты движения поршня с 7000 до 8000 цикл/мин, тепловой эффективный КПД энергоустановки η_e растёт на 5% (рис.4.4б).

Таблица 4.1

Теплотехнические характеристики энергоустановки в расчётной точке

Исходные величины:	
Давление окружающей среды, МПа	0,100000
Температура окружающей среды, град. К	293,15
Геометрическая степень сжатия	15,0
Рассчитанные величины:	
Частота движения поршня, цикл/мин	8159,8
Низшая теплота сгорания топлива, кДж/кмоль	43929,50
Давление остаточных газов, МПа	0,084966
Температура подогрева свежего заряда, град. К	4,4
Плотность заряда на впуске, кг/м ³	1,188
Давление на впуске, МПа	0,100000
Температура на впуске, град. К	293,15
Действительная степень сжатия	10,80
Давление в конце впуска, МПа	0,099124
Температура в конце впуска, град. К	438,44
Температура остаточных газов, град. К	986,97
Коэффициент остаточных газов	0,200
Коэффициент наполнения	0,609
Показатель политропы сжатия	1,36043
Давление сжатия, МПа	2,524
Температура сжатия, град. К	1033,69
Давление горения (max), МПа	5,979
Степень повышения давления	2,63
Температура горения (max), град. К	2548,15
Показатель политропы расширения	1,26072
Давление начала выхлопа, МПа	0,331
Температура начала выхлопа, град. К	1097,07
Индикаторное давление скруглённой диаграммы, МПа	0,79039
Давление механических потерь, МПа	0,08441
Эффективное давление, МПа	0,70598
Механический КПД	0,8932
Индикаторный КПД	0,3320
Эффективный КПД	0,2966
Индикаторный расход топлива, г/кВт·час	246,8
Эффективный расход топлива, г/кВт·час	276,3
Рабочий объем двигателя, см ³	730,4
Индикаторная мощность, кВт	55,34
Эффективная тепловая мощность, кВт	49,42
Часовой расход топлива, кг/час	13,66
Литровая мощность, кВт	67,7

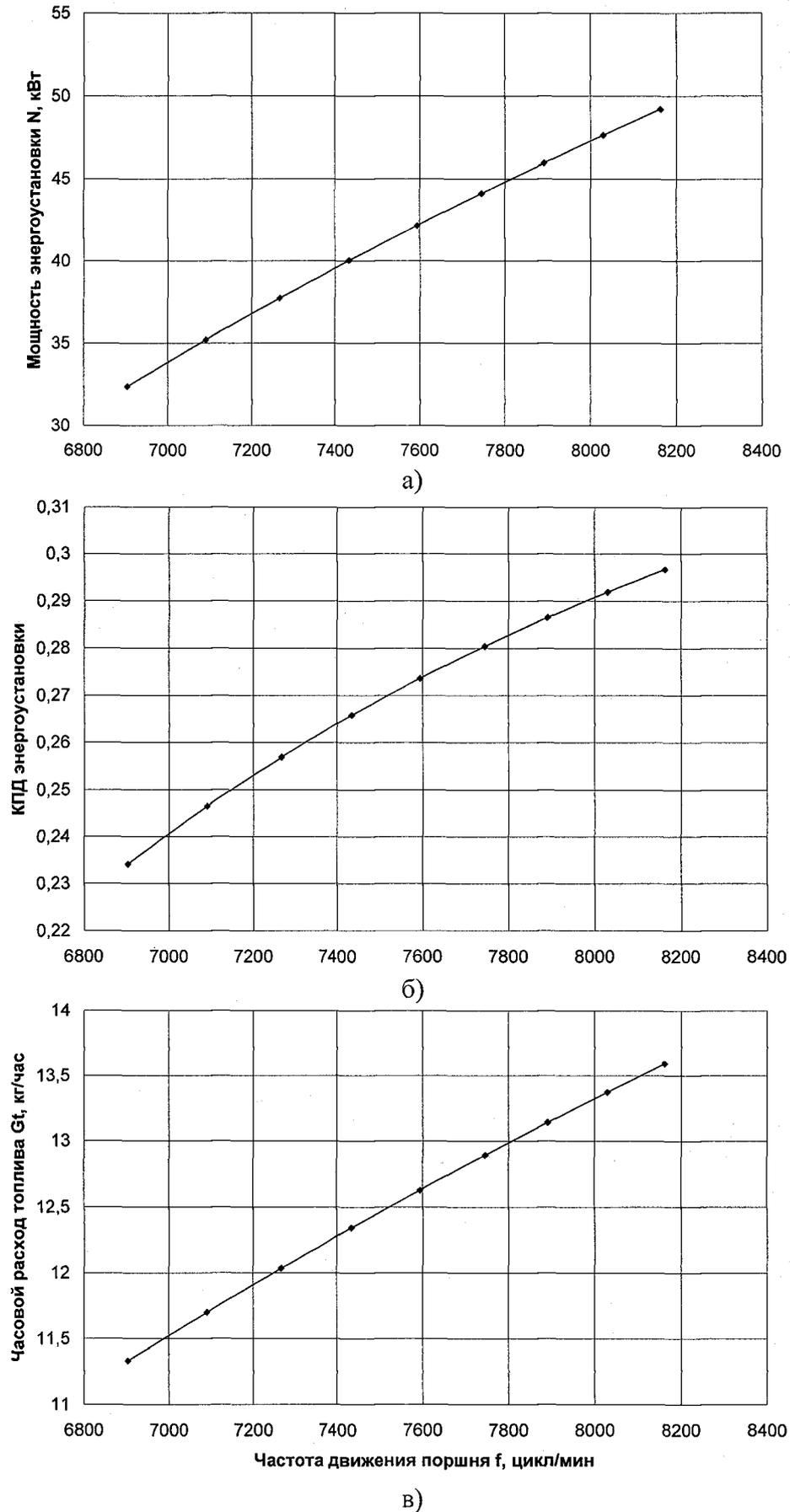


Рис.4.4. Зависимость эффективной тепловой мощности N_e (а), эффективного теплового КПД η_e (б), расхода топлива G_t (в) от частоты движения поршня

Теплотехническая характеристика линейного ДВС является функцией многих переменных. Так скорость движения поршня является функцией диаметра цилиндра, хода поршня, параметров продувки цилиндра, массы поршня и т.д.

Проанализировано влияние массы поршня и диаметра рабочего цилиндра (при постоянном рабочем объёме $V_h = 730 \text{ см}^3$) на теплотехнические характеристики свободнопоршневой энергоустановки (рис.4.5).

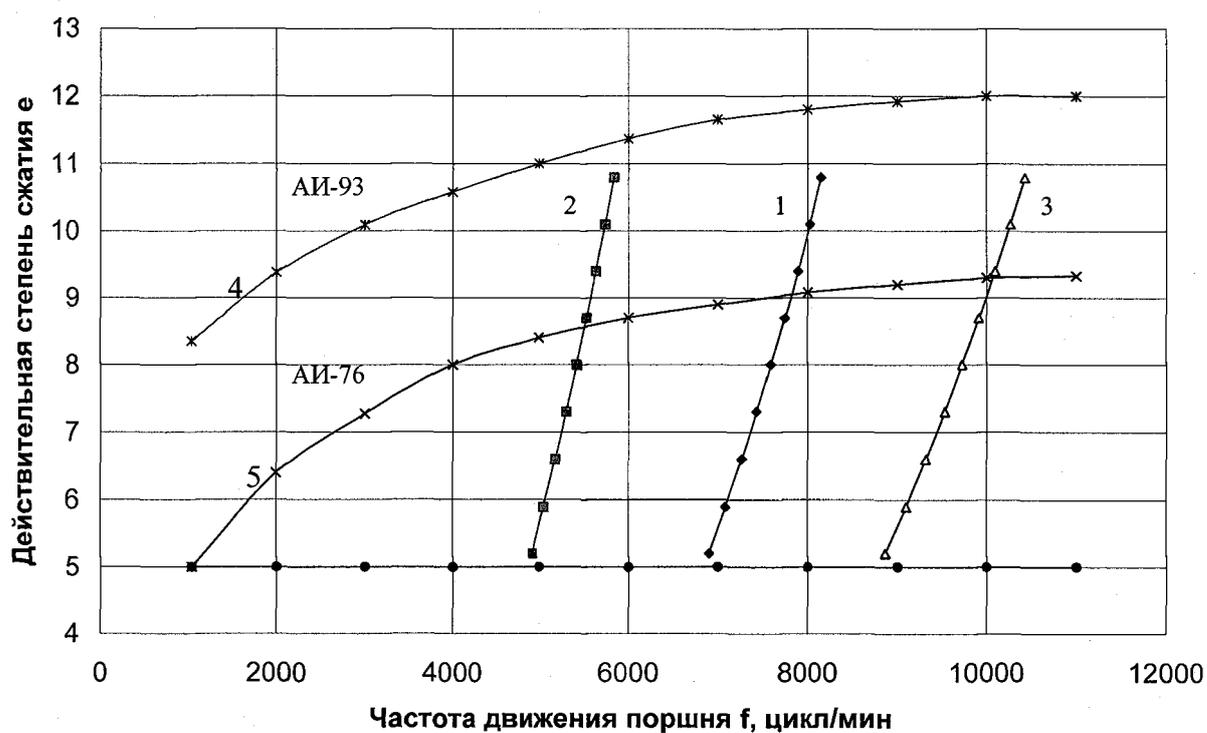


Рис.4.5. Влияние массы поршня m , диаметра цилиндра $d_{ц}$ на работу свободнопоршневой энергоустановки:

1 - $m = 0,6 \text{ кг}$, $d_{ц} = 76 \text{ мм}$, $V_h = 730 \text{ см}^3$ ($\epsilon = 15$);

2 - $m = 1,2 \text{ кг}$, $d_{ц} = 76 \text{ мм}$, $V_h = 730 \text{ см}^3$ ($\epsilon = 15$);

3 - $m = 0,6 \text{ кг}$, $d_{ц} = 87 \text{ мм}$, $V_h = 730 \text{ см}^3$ ($\epsilon = 15$),

где, V_h рабочий объём в расчётной точке, ϵ - степень сжатия;

4 и 5 - границы детонационной стойкости при работе на бензинах АИ-93 и АИ-76)

Из рис.4.5 видно, что увеличение массы поршня в два раза смещает кривую работы двигателя (кривая 2) в область меньших частот ($f = 5000 \dots 6000$ циклов/мин). Уменьшение хода поршня S в 1,3 раза (при увеличении диаметра $d_{ц}$ для сохранения постоянства рабочего объёма $V_h = 730 \text{ см}^3$) приводит к сме-

щению кривой работы двигателя (кривая 3 рис.4.5) в область повышенных частот ($f = 9000 \dots 11000$ циклов/мин).

При анализе графиков видно, что для достижения максимальных частот перемещений поршня (для получения максимального КПД установки) массу поршня необходимо как можно больше снижать при параллельном увеличении диаметра рабочей камеры. Увеличение диаметра цилиндра с соответственным уменьшением хода поршня ограничивается ухудшением продувки цилиндра. Уменьшение массы поршня лимитируется прочностью его конструкции.

Отличительная особенность работы свободнопоршневой энергоустановки - работа в узком диапазоне рабочих частот движения поршня (так при изменении действительной степени сжатия ε с 5 до 11 частоты f лежат в пределах от 6000 до 9000 циклов/мин (рис.4.5)). Возможность выхода сразу на повышенные частоты (минуя низкие) приводит к возможности работы двигателя на повышенных степенях сжатия, что видно из рис.4.5. На установившейся частоте $f = 8159,8$ циклов/мин и геометрической степени сжатия $\varepsilon = 15$ при действительной степени сжатия двигателя $\varepsilon_d = 10,8$ детонация топлива АИ-93 отсутствует (кривая 4 рис.4.5) [56, 57, 77].

Следует отметить, что только по теплотехническим характеристикам свободнопоршневой энергоустановки ещё нельзя судить о совершенстве, так как не известен вариант съёма мощности (механический, электрический, газодинамический и т.д.), связанный с преобразованием возвратно-поступательного движения поршня в однонаправленное вращение выходного вала и потерей мощности вследствие потерь. В настоящей работе предпочтение отдано линейному электрогенератору, как наиболее перспективному преобразователю энергии возвратно-поступательного движения поршня свободнопоршневой энергоустановки в электрическую энергию.

Необходимо отметить, что рассмотренный вариант (рис.4.1) не является единственным. Возможно создание множества вариантов моделей силовых установок, подлежащих дальнейшей экспертной оценке.

4.2. Особенность работы линейного электрогенератора

Рассматриваемый свободнопоршневой электрогенератор представляет собой двигатель внутреннего сгорания с двумя рабочими камерами сгорания (рис.4.1) и одним подвижным поршнем-магнитом. В результате взаимодействия постоянного магнита с обмоткой катушки (неподвижно закреплённой на корпусе) наводится электродвижущая сила (ЭДС) индукции (рис.4.6).

Выбраны два основных направления исследования СПГЭ.

Первое направление - исследование и совершенствование теплотехнических характеристик двигателя.

Второе направление - исследование и совершенствование узла "катушка-магнит" с целью

максимального использования энергетических возможностей этой системы (max КПД линейного электрогенератора) за счёт выбора оптимальных геометрических характеристик как магнита, так и катушки.

Принцип получения электрической энергии в свободнопоршневой энергоустановке основан на возникновении электромагнитной энергии в результате взаимодействия поступательно движущегося магнита в неподвижной катушке, состоящей из большого числа витков проволоки [55, 73, 75], при этом

$$E_i = d\Phi/dt, \quad (4.7)$$

или

$$E_i = V \cdot [d\Phi/ds], \quad (4.8)$$

где E_i – ЭДС индукции; Φ – магнитный поток, создаваемый постоянным магнитом; s – перемещение поршня; V – скорость поршня.

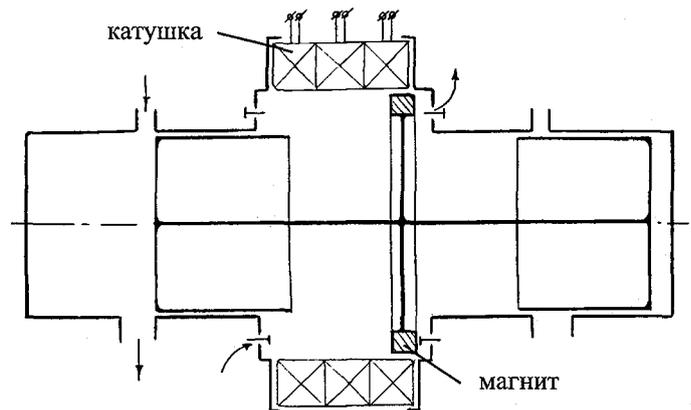


Рис.4.6. Схема свободнопоршневого электрогенератора с двумя рабочими камерами и одним поршнем-магнитом

За счёт выбора оптимальных геометрических характеристик как магнита, так и катушки, достигается максимальное использование энергетических возможностей системы "катушка-магнит" (составляющая $d\Phi/ds$). Скорость поршня V пропорциональна частоте f движения поршня, так что электрическая мощность СПГЭ увеличивается с увеличением частоты движения поршня в цилиндре. При создании высокоэффективного СПГЭ необходимо совершенствовать как электротехническую, так и теплотехническую части энергоустановки и искать их совместный оптимум.

Общий КПД свободнопоршневой энергоустановки η_o складывается из эффективного (теплотехнического) КПД η_e энергоустановки и КПД преобразователя возвратно-поступательного движения поршня в однонаправленное вращение выходного вала (в данном случае, электрического КПД $\eta_{эл}$ линейного электрогенератора).

$$\eta_o = \eta_e \cdot \eta_{эл}, \quad (4.9)$$

Электрическая составляющая ЭДС является функцией многих переменных. Так $d\Phi/ds$ - функция диаметра и длины цилиндра, характеристик магнита, количества витков проволоки, материала, способа намотки проволоки и др.

Основное влияние на электрический КПД свободнопоршневой энергоустановки оказывает частота движения поршня f , ход поршня Sh и масса поршня-магнита m . Увеличение частоты движения поршня f , а следовательно и скорости поршня V увеличивает ЭДС индукции (4.8), увеличение хода поршня Sh увеличивает полезную длину катушки, увеличение массы поршня m увеличивает магнитный поток, проходящий через катушку.

Влияние вышеперечисленных факторов на электрический КПД выразим в виде приближённой формулы

$$\eta_{эл} = 1 - \frac{\kappa}{f \cdot Sh \cdot \sqrt{m}} \quad (4.10)$$

где κ - поправочный коэффициент, и определим оптимальные - с точки зрения \max КПД - массовые (рис.4.7) и геометрические (ход и диаметр поршня) (рис.4.7) характеристики энергоустановки.

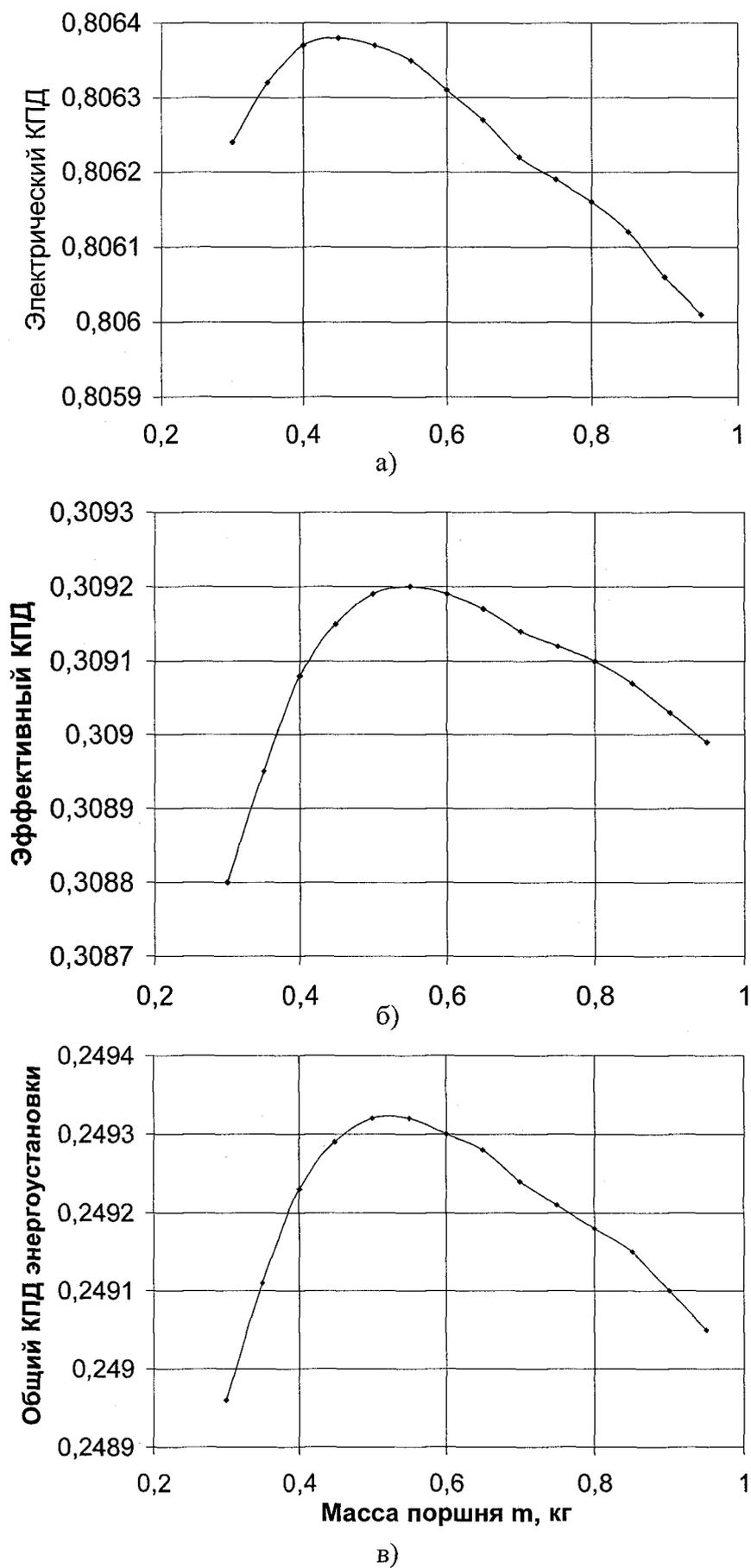


Рис.4.7. Влияние массы поршня m на электрический КПД (а), эффективный КПД (б) и общий КПД (в) энергоустановки

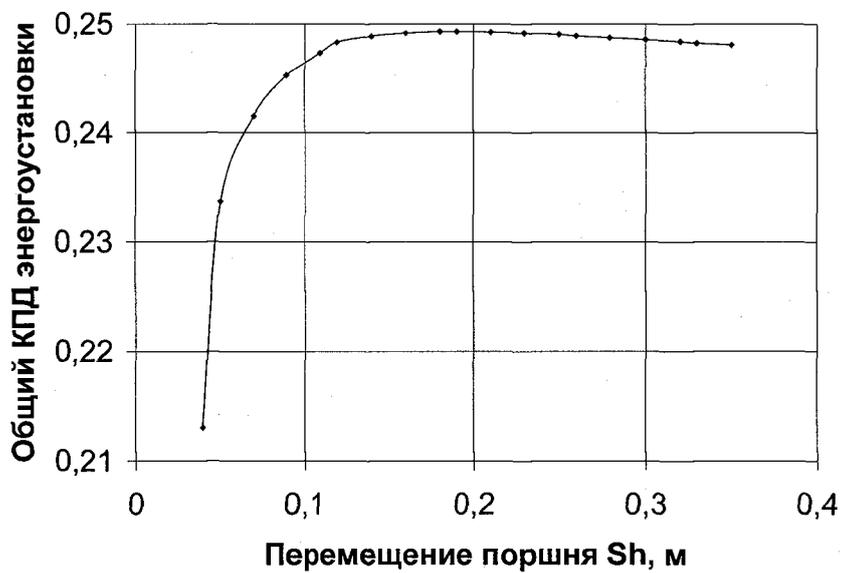
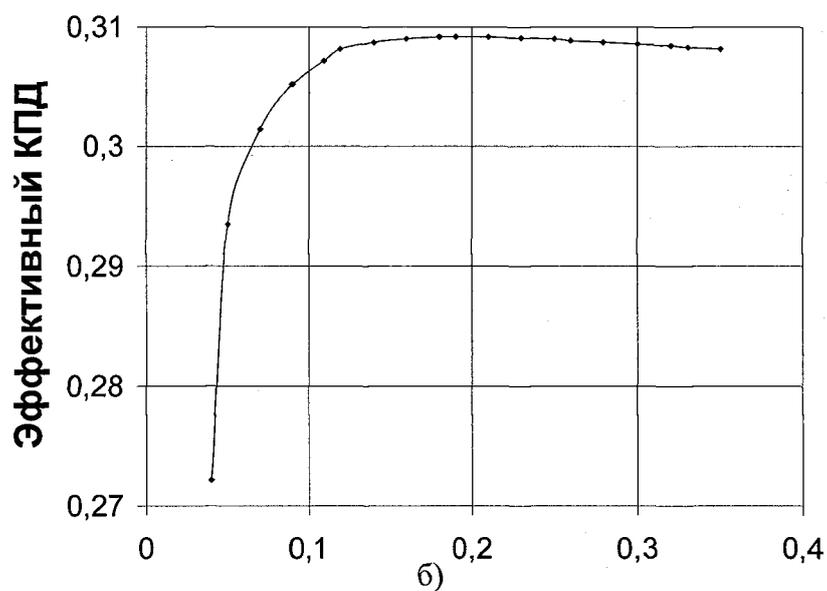
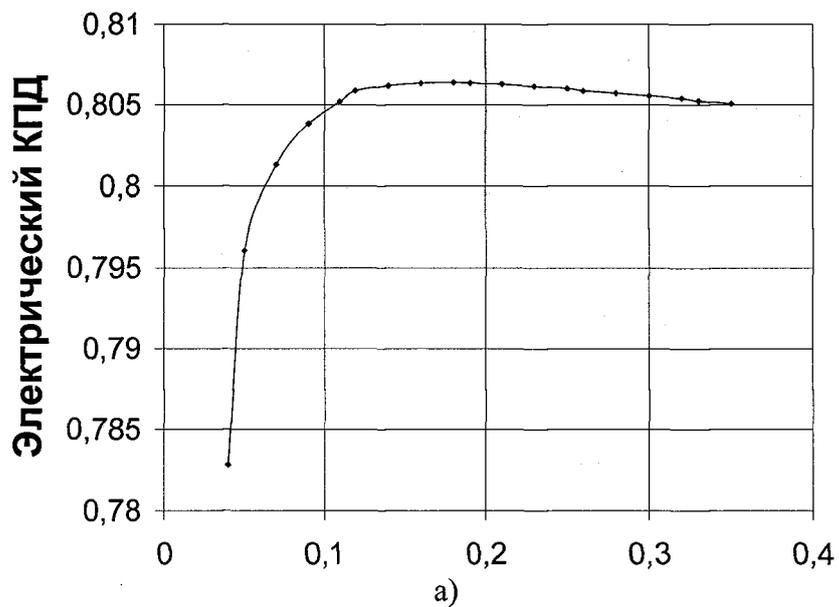


Рис.4.8. Влияние хода поршня Sh на электрический КПД (а), эффективный КПД (б) и общий КПД (в) энергоустановки

Из графиков рис.4.7 и рис.4.8 видно, что наибольший КПД энергоустановки $\eta_o = 24,93\%$ достигается при массе поршня $m = 0,52$ кг и рабочем ходе поршня $Sh = 0,19$ м, при этом частота движения поршня f равна 3630 цикл/мин. Следует отметить, что данные оптимальные характеристики характерны только для максимального КПД свободнопоршневой энергоустановки, но не для максимальной энергетической мощности. С ростом частоты движения поршня f растёт эффективная, а следовательно и выходная электрическая мощность энергоустановки (при некотором падении КПД).

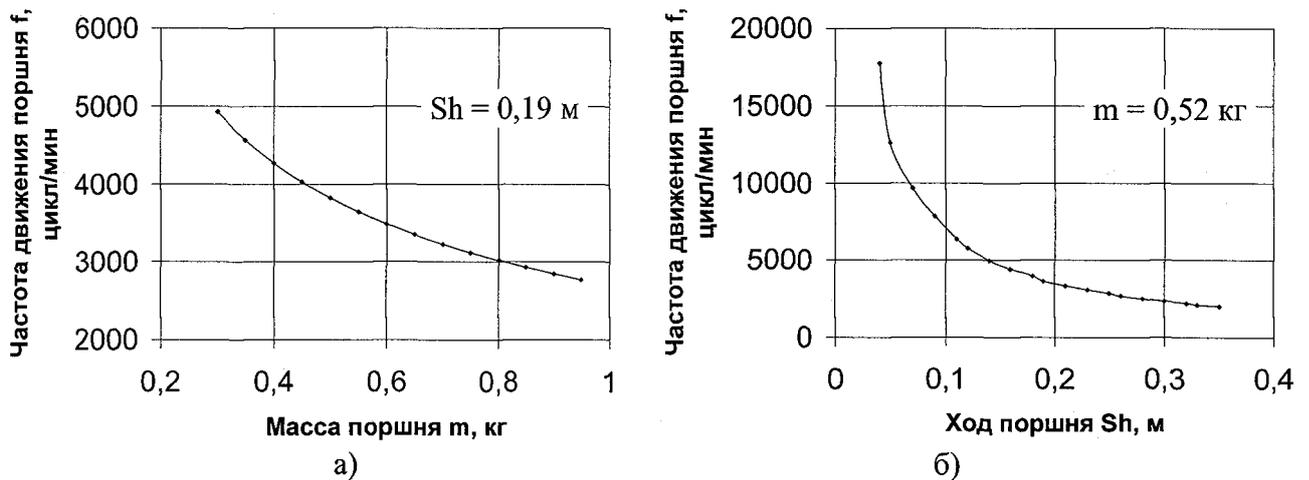


Рис.4.9. Изменение частоты движения поршня f в зависимости от массы поршня (а) и рабочего хода поршня (б)

Применительно к авиации, для уменьшения веса энергоустановки необходимо стремиться к повышению литровой мощности, т.е. к увеличению частоты движения поршня, с сохранением высоких показателей КПД. Для этого нужно смещать оптимум КПД в сторону высоких частот, используя новые магнитные материалы, способы намотки катушки, совершенствуя рабочий процесс.

Произведём сравнение характеристик свободнопоршневой энергоустановки с авиационным двигателем "Rotax-582/40UL DCDI" (приложение 2) для оценки возможности установки такой энергоустановки на летательный аппарат (рис.4.10).

Зададимся КПД линейного электрогенератора равным 80% [85] и пересчитаем полученные ранее характеристики табл.4.1.

Сравнение двух вариантов (двигателя "Rotax" и СПГЭ) показывает, что СПГЭ обладает меньшим часовым расходом топлива на режиме максимальной мощности 40 кВт. Так часовой литровый расход топлива (табл.4.1) $Gt_{спгэ} = Gt/\rho_m = 13,66/0,899 = 15,2$ л/час (рис.4.11) (где $\rho_m = 0,899$ кг/л - плотность бензина), что меньше чем у двигателя "Rotax" $Gt_{rotax} = 23$ л/час на $\Delta = (23 - 15,2)/23 \times 100 = 33,9 \%$.

Сравнение по удельным показателям показало, что у СПГЭ удельный расход топлива при максимальной мощности (40кВт) $g_{мспгэ} = G_m/(N_e \cdot \rho_m) = 13,66/(40 \cdot 0,899) = 0,380$ л/кВт·час = 380 мл/кВт·час, меньше удельного расхода топлива двигателя "Rotax", у которого $g_m = Gt/N_e = 23/40 = 0,575$ л/кВт·час = 575 мл/кВт·час.

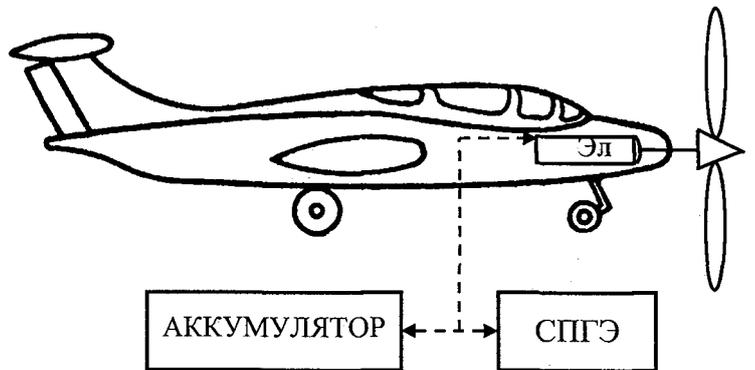


Рис.4.10. Вариант применения СПГЭ в качестве гибридной силовой установки на летательном аппарате

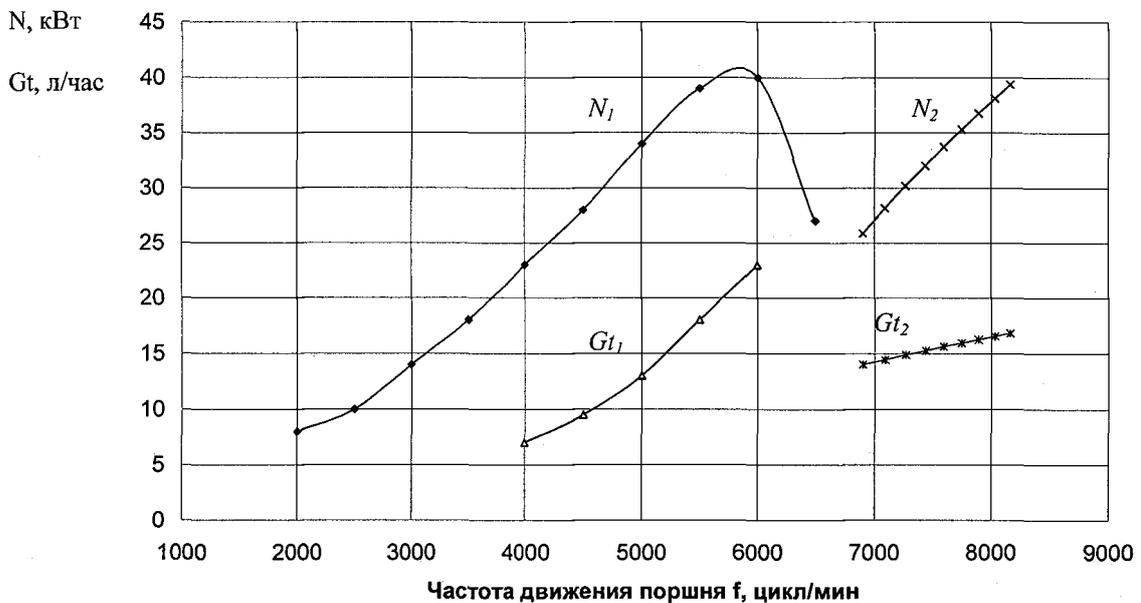


Рис.4.11. Выходная мощность N и часовой расход топлива Gt энергоустановки авиационного двигателя "Rotax" (N_1, Gt_1) и исследуемого варианта СПГЭ (N_2, Gt_2)

Если не учитывать вес электромоторов, входящих в состав энергоустановки СПГЭ летательного аппарата (рис.4.10) и приводящих воздушные винты

во вращение (в отличие от энергоустановки "Rotax", выходной вал которого через редуктор связан с воздушным винтом), то удельный вес СПГЭ соразмерен с удельным весом двигателя "Rotax" и равен $\gamma_{\text{уд}} = m/N_e = 46/40 = 1,15$ кг/кВт (где m - масса силовой установки).

Эти факты свидетельствуют о высоких показателях энергоустановок, разработанных на базе СПГЭ, и о возможности их применения на летательных аппаратах в качестве дополнительной или основной силовой установки (рис.4.10).

Полученные результаты исключают возможность рекомендаций замены двигателя "Rotax" на предлагаемую свободнопоршневую энергоустановку для всех случаев применения легкомоторного самолёта. Рациональность подобной замены может быть при создании лёгкомоторных самолётов, способного выполнять длительные беспосадочные полёты, при которых вес дополнительного электропривода будет компенсирован уменьшением веса топлива на взлётном режиме, а также для некоторых летательных аппаратов с нетрадиционной энергетикой, например, в качестве вспомогательной энергоустановки гелиосамолёта.

С использованием известных методик расчёта ДВС и конструкторских решений [2, 10, 18, 19, 20, 50, 62, 65, 89] спроектирован (рис.4.12) и изготовлен макет СПГЭ (рис.4.13), отличающийся новизной и полезностью [25].

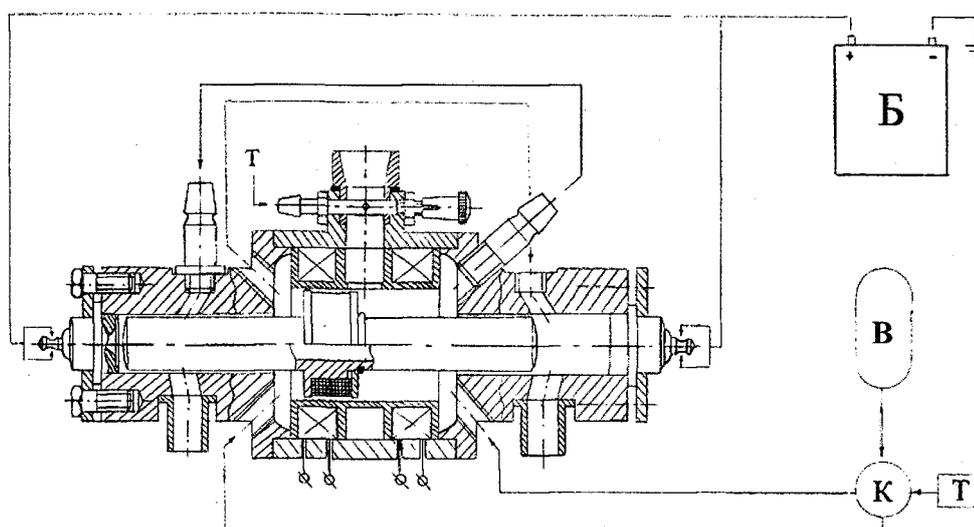


Рис.4.12. Эскизный проект СПГЭ

Б - батарея системы зажигания; В-К-Т - система воздушного запуска установки

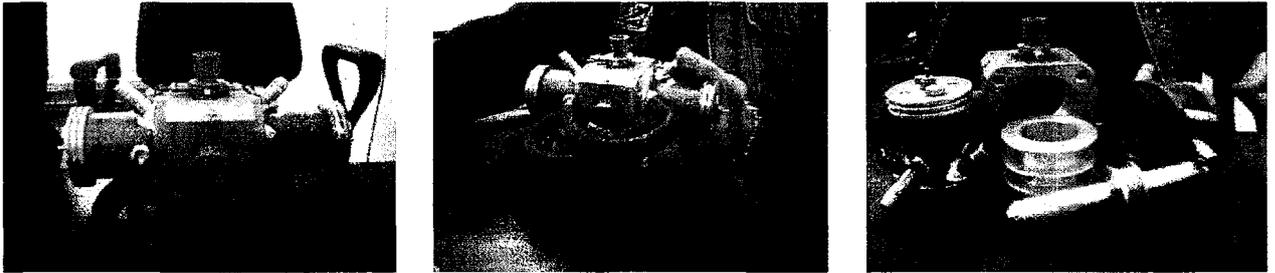


Рис.4.13. Макет свободнопоршневой энергоустановки

Результаты поисковых исследований могут представить практический интерес для создания основной или вспомогательной аварийной бортовой электростанции, элемента автомобильной или авиационной гибридной установки, автономных источников электроэнергии (миниэлектростанции, линейные компрессоры) и т.д.

4.3. Поисковые возможности метода композиции

На этапах предъэскизного проектирования двигателя, при выборе его принципиальной и структурной схемы, используются не все этапы предложенной ранее методики композиции механизмов (рис.3.10). Можно пренебречь этапами разработки конструкции устройства, оценкой конструкции и технологических факторов, концентрируя внимание на анализе принципиальных схем, наиболее удовлетворяющих основным ограничениям, наложенных на создаваемую конструкцию.

Основная принципиальная особенность предлагаемой методики заключается в организации процесса поиска *от описательной постановки задачи до получения вариантов структурных схем* проектируемого механизма.

Одним из важных этапов методики композиции механизмов является этап постановки задачи и выбора основных ограничений. Необходимо сформулировать "основную кинематическую идею" поиска нового механизма. Ранее подобные основные кинематические задачи были сформулированы применительно к поиску оригинальных схем двигателей, подобных двигателю Ванкеля и орбитальному двигателю. Ради достижения этой цели на этапе предъэскизного проектирования можно пренебречь некоторыми недостатками предваритель-

ных вариантов, допуская возможность их дальнейших модификаций и рассматривая их как подсказки для генерирования новых вариантов.

Основной кинематической идеей при создании свободнопоршневой энергоустановки можно считать исключение нормальных нагрузок поршня на цилиндр и возможность реализации термодинамического процесса при различных степенях сжатия.

На промежуточных этапах композиции генерируются варианты абстрактных векторных моделей при сравнительной оценке кинематического и динамического совершенства потенциально соответствующих им механизмов.

В общей теории композиции механизмов при создании наборов вариантов векторных моделей используются библиотеки векторных моделей и приёмов их модификаций. Многоконтурные векторные модели обеспечивают возможность реализации практически любых математических функций. Однако, особенность подхода к поиску механизмов машин объёмного вытеснения с учётом требований минимизации структурной схемы основного механизма и особенностей массового производства двигателей заключается в концентрации внимания на механизмах с минимальным числом звеньев, отображаемых, в идеальном случае, одноконтурными векторными моделями.

Опыт практической реализации предложенной методики при поисковом конструировании свободнопоршневых энергоустановок убеждает в том, что не всегда рационально использовать все структурно-конструктивные варианты совмещённых подвижных соединений, как основу возможных вариантов проектируемой установки. Структурно-конструктивные формулы табл.2.9-2.14 используются как справочный материал, облегчающий выбор наиболее подходящих для конкретной задачи вариантов структур для дальнейшего детального анализа.

Предложенная методика композиции свободнопоршневых энергоустановок (рис.3.10) при реальном проектировании использует лишь ограниченные возможности поиска оптимальных принципиальных схем на этапе предэскизного проектирования. Например, заранее отпадает возможность использования

различных физических эффектов получения электрической энергии (табл.3.1), нестандартных видов топлива и т.д. Также необходимо учитывать реальные производственные и технологические возможности.

Предлагаемый метод позволяет оценить совершенство разных схем свободнопоршневых энергоблоков по выбранным критериям оценки (таким как мощность, КПД, удельный вес конструкции). Наибольшее предпочтение отдано свободнопоршневому электрогенератору, как наиболее предпочтительному среди свободнопоршневых энергоустановок [54, 60, 71, 76, 82, 84].

В качестве примера приведены результаты композиции свободнопоршневых электрогенераторов с выходной мощностью $N = 40$ кВт (первый вариант расчёта) и объёмом $Vh = 584$ см³ (второй вариант). Первый вариант расчёта позволяет по заданной выходной электрической мощности энергоустановки определить частоту движения поршня, его КПД, удельный и часовой расход топлива и другие характеристики. Второй вариант расчёта позволяет по заданному рабочему объёму двигателя энергоустановки оценить совершенство вариантов по мощностным, экономическим показателям, определить рабочую частоту энергоустановки и другие характеристики.

Анализ возможных вариантов комбинаций свободнопоршневого ДВС с генератором электроэнергии проведён с использованием ранее предложенной методики композиции свободнопоршневых энергоустановок (рис.3.10), с учётом ранее исследованных структурно-конструктивных вариантов (табл.2.8-2.14) и физических эффектов получения электрической энергии (табл.3.1).

На рис.4.14 приведены наиболее характерные варианты из множества проанализированных принципиальных схем свободнопоршневых энергоустановок, три из которых (рис.4.14а, б, в) могут использоваться в качестве гибридных энергоустановок на летательных аппаратах (рис.4.10) или наземном транспорте.

Вариант рис.4.14а - простая конструкция, перемещение поршня осуществляется с одной стороны пружина, с другой - газовые силы рабочей камеры.

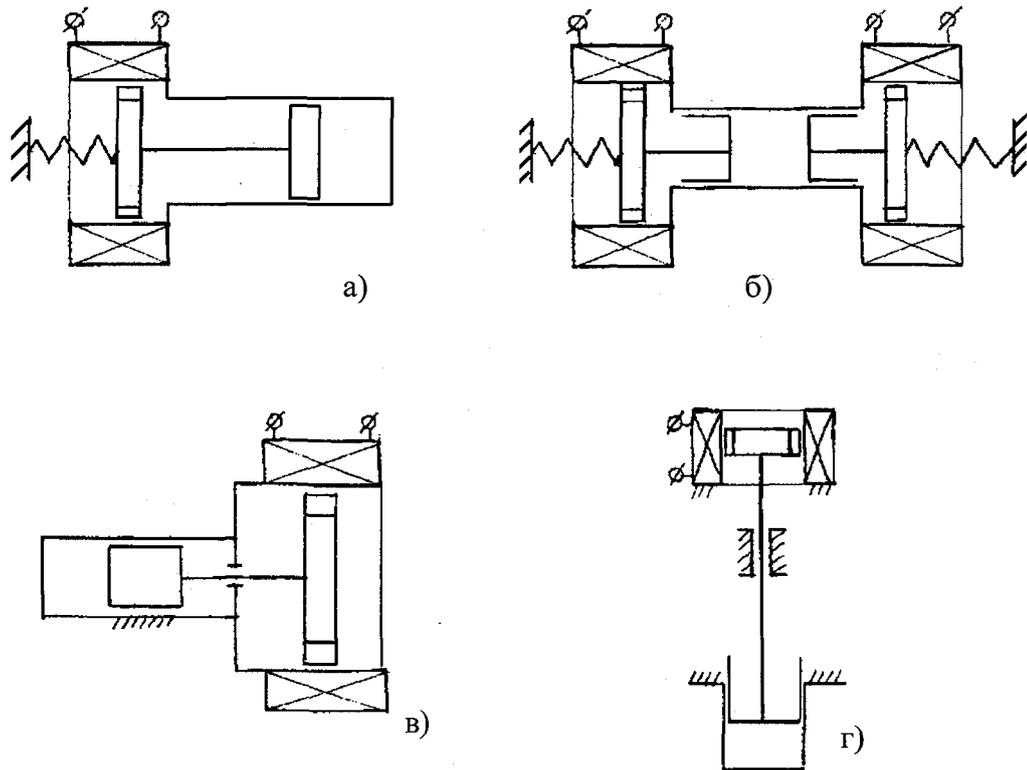


Рис.4.14. Варианты СПГЭ

Вариант рис.4.14б отличается полной динамической уравновешенностью [63], однако требует согласования движения двух поршней, образующих общую рабочую камеру.

Соединение линейного ДВС двустороннего действия и электрогенератора (рис.4.14в) приводит к сокращению осевых габаритов, но требует разработки более сложной системы газообмена и воспламенения рабочей смеси.

Использование гравитации в однокамерном линейном ДВС (рис.4.14г) позволяет создать наиболее простую конструкцию СПГЭ, который, однако, не обеспечивает высокой частоты перемещения поршня, а, следовательно, и минимизации веса конструкции энергоблока.

Для выбранных вариантов созданы структурно-конструктивные динамические модели и, используя разработанное программное обеспечение (см. приложение1), рассчитаны важнейшие оценочные показатели совершенства свободнопоршневых энергоустановок [44, 70]. Рассматривались два основных варианта расчёта:

1.) По заданной мощности ($N = 40$ кВт) определены основные выходные характеристики всех четырёх вариантов энергоустановок (в том числе коэффициент полезного действия силовой установки).

2.) По заданному рабочему объёму ($V = 584$ см³) определены мощности и коэффициенты полезного действия вариантов энергоустановок.

Принимаем следующее допущение - электрический КПД катушки не зависит от частоты движения поршня и равен 0,8 [85]. Коэффициент сжатия пружины выбираем из условия равенства рабочих ходов поршней энергоустановок на установившемся режиме.

Результаты сравнительного анализа динамических характеристик приведены в табл.4.2 и 4.3.

Сравнение с авиационным двигателем "Rotax-582/40UL" показывает, что СПГЭ обладает меньшим часовым расходом топлива при одинаковой мощности 40 кВт. Так для варианта рис.4.14б часовой литровый расход топлива $Gt = Gt_{\text{бенз}}/\rho_m = 13,19/0,899 = 15,46$ л/час (где $\rho_m = 0,899$ кг/л - плотность бензина).

Результаты сравнительного анализа первого варианта расчёта (табл.4.2) позволяют признать наиболее удачным вариантом структурно-конструктивную схему свободнопоршневой установки рис.4.14б. Она обладает наибольшим коэффициентом полезного действия и отличается полной динамической уравновешенностью, однако требует согласования движения двух поршней, образующих общую рабочую камеру. Возможность подобного согласования обеспечивает наличие двух индукционных систем (служащих также и для запуска самой энергоустановки), но требует создания сложной системы регулирования [9, 33, 46, 66, 59, 74].

Сформулированы требования к микропроцессорной системе управления СПГЭ, значительно повышающей технические характеристики энергоустановки.

Таблица 4.2

Первый вариант (выходная электрическая мощность $N = 40 \text{ кВт} = \text{const}$)

1. Одна пружина, один поршень, одна камера сгорания (рис.4.14а)			
Степень сжатия	$e = 15$	Действ. ход поршня	$S_{porh} = 0,100 \text{ м}$
Частота двигателя	$f = 7846,5 \text{ цикл/мин}$	Объём двигателя	$V_h = 787,98 \text{ см}^3$
Масса поршня	$M = 0,300 \text{ кг}$	Тепловая мощность	$N_e = 50 \text{ кВт}$
Масса пружины	$M_{пр} = 0,200 \text{ кг}$	Литровая мощность	$N_{л} = 63,6 \text{ кВт}$
Коэф. сжатия пружины	$K_{пр} = 90000 \text{ Н/м}$	Часовой расход топлива	$G_t = 14,13 \text{ кг/час}$
Рабочий ход поршня	$Sh = 0,100 \text{ м}$	КПД общий	$\eta_o = 0,2324$
2. Два поршня, две пружины, одна камера сгорания (рис.4.14б)			
Степень сжатия	$e = 15$	Действ. ход поршня	$S_{porh} = 0,048 \text{ м}$
Частота двигателя	$f = 10062,7 \text{ цикл/мин}$	Объём двигателя	$V_h = 476 \text{ см}^3$
Масса поршня	$M = 0,300 \text{ кг}$	Тепловая мощность	$N_e = 50 \text{ кВт}$
Масса пружины	$M_{пр} = 0,200 \text{ кг}$	Литровая мощность	$N_{л} = 105,1 \text{ кВт}$
Коэф. сжатия пружины	$K_{пр} = 150000 \text{ Н/м}$	Часовой расход топлива	$G_t = 13,19 \text{ кг/час}$
Рабочий ход поршня	$Sh/2 = 0,042 \text{ м}$	КПД общий	$\eta_o = 0,2488$
3. Один поршень, две камеры сгорания (рис.4.14в)			
Степень сжатия	$e = 15$	Объём двигателя	$V_h = 784 \text{ см}^3$
Частота двигателя	$f = 7643,2 \text{ цикл/мин}$	Тепловая мощность	$N_e = 50 \text{ кВт}$
Масса поршня	$M = 0,600 \text{ кг}$	Литровая мощность	$N_{л} = 63,9 \text{ кВт}$
Рабочий ход поршня	$Sh = 0,079 \text{ м}$	Часовой расход топлива	$G_t = 13,74 \text{ кг/час}$
		КПД общий	$\eta_o = 0,2390$
4. Один поршень, одна камера сгорания, массивное тело (рис.4.14г)			
Степень сжатия	$e = 10$	Объём двигателя	$V_h = 431814 \text{ см}^3$
Частота двигателя	$f = 14,9 \text{ цикл/мин}$	Тепловая мощность	$N_e = 50 \text{ кВт}$
Масса поршня	$M = 1000,0 \text{ кг}$	Литровая мощность	$N_{л} = 0,1 \text{ кВт}$
Рабочий ход поршня	$Sh = 0,819 \text{ м}$	Часовой расход топлива	$G_t = 15,51 \text{ кг/час}$
Действ. ход поршня	$S_{porh} = 18,990 \text{ м}$	КПД общий	$\eta_o = 0,2111$

Таблица 4.3

Второй вариант (рабочий объём энергоустановки $V_h = 584 \text{ см}^3 = \text{const}$)

1. Одна пружина, один поршень, одна камера сгорания (рис.4.14а)			
Степень сжатия	$e = 15$	Действ. ход поршня	$S_{porh} = 0,129 \text{ м}$
Частота двигателя	$f = 5505,5 \text{ цикл/мин}$	Тепловая мощность	$N_e = 27,19 \text{ кВт}$
Масса поршня	$M = 0,300 \text{ кг}$	Электрическая мощность	$N_{п} = 21,75 \text{ кВт}$
Масса пружины	$M_{пр} = 0,150 \text{ кг}$	Часовой расход топлива	$G_T = 7,65 \text{ кг/час}$
Коэф. сжатия пружины	$K_{пр} = 42000 \text{ Н/м}$	Литровая мощность	$N_{л} = 46,5 \text{ кВт}$
Рабочий ход поршня	$Sh = 0,129 \text{ м}$	КПД общий	$\eta_o = 0,2330$
2. Два поршня, две пружины, одна камера сгорания (рис.4.14б)			
Степень сжатия	$e = 15$	Действ. ход поршня	$S_{porh} = 0,069 \text{ м}$
Частота двигателя	$f = 8135,5 \text{ цикл/мин}$	Тепловая мощность	$N_e = 58,69 \text{ кВт}$
Масса поршня	$M = 0,300 \text{ кг}$	Электрическая мощность	$N_{п} = 46,95 \text{ кВт}$
Масса пружины	$M_{пр} = 0,200 \text{ кг}$	Часовой расход топлива	$G_T = 15,34 \text{ кг/час}$
Коэф. сжатия пружины	$K_{пр} = 100000 \text{ Н/м}$	Литровая мощность	$N_{л} = 100,4 \text{ кВт}$
Рабочий ход поршня	$Sh/2 = 0,064 \text{ м}$	КПД общий	$\eta_o = 0,2508$
3. Один поршень, две камеры сгорания (рис.4.14в)			
Степень сжатия	$e = 15$	Тепловая мощность	$N_e = 39,78 \text{ кВт}$
Частота двигателя	$f = 8097,3 \text{ цикл/мин}$	Электрическая мощность	$N_{п} = 31,82 \text{ кВт}$
Масса поршня	$M = 0,600 \text{ кг}$	Часовой расход топлива	$G_T = 10,76 \text{ кг/час}$
Рабочий ход поршня	$Sh = 0,064 \text{ м}$	Литровая мощность	$N_{л} = 68,1 \text{ кВт}$
		КПД общий	$\eta_o = 0,2425$
4. Один поршень, одна камера сгорания, массивное тело (рис.4.14г)			
Степень сжатия	$e = 10$	Тепловая мощность	$N_e = 0,78 \text{ кВт}$
Частота двигателя	$f = 142,6 \text{ цикл/мин}$	Электрическая мощность	$N_{п} = 0,62 \text{ кВт}$
Масса поршня	$M = 100,000 \text{ кг}$	Часовой расход топлива	$G_T = 0,24 \text{ кг/час}$
Рабочий ход поршня	$Sh = 0,129 \text{ м}$	Литровая мощность	$N_{л} = 1,3 \text{ кВт}$
Действ. ход поршня	$S_{porh} = 0,152 \text{ м}$	КПД общий	$\eta_o = 0,2134$

4.4. Требования к микропроцессорной системе управления

Большинство известных конструкций свободнопоршневых генераторов электроэнергии, поршни которых связаны с магнитами, перемещающимися вдоль оси неподвижных соленоидов, выполнены с механическими системами газораспределения и воспламенения топлива.

Создание микропроцессорной системы управления свободнопоршневого генератора электроэнергии значительно расширяет его возможности и область практического применения (рис.4.10).

Определены четыре основных режима работы этой системы.

Режим основной. Поршень совершает перемещения за счёт циклически изменяющегося давления в рабочей камере цилиндра; магнит возбуждает в обмотке катушки переменное напряжение (режим генератора).

Режим запуска. Магнит совершает перемещения за счёт подачи на обмотку катушки напряжения переменной частоты; поршень создаёт в рабочей камере цилиндра давление рабочей смеси (режим электродвигателя).

Режим контроля. Если в режиме запуска достигнуто воспламенение смеси в рабочей камере (зажигание), осуществляется переход к режиму генератора.

Если в основном режиме к моменту достижения максимального давления в рабочей камере нет зажигания, осуществляется переход к режиму электродвигателя на частоте основного режима.

Режим регулирования. При изменении нагрузки на электрогенератор по определённой программе регулируются подача топлива и момент искрообразования по сигналам датчиков положения поршней или давления в рабочей камере.

Режимы контроля и регулирования осуществляются автоматически как при запуске, так и при работе электрогенератора.

Помимо всего вышеперечисленного система управления свободнопоршневого генератора электроэнергии должна включать в себя систему зарядки аккумулятора, систему преобразования переменного (несинусоидального) напря-

жения в постоянное, систему стабилизации напряжения, поступающего на обмотки аккумулятора.

Система СПГЭ-аккумулятор допускает как совместную, так и отдельную работу СПГЭ и аккумулятора в качестве источника электроэнергии. Система управления должна обеспечить оптимальную работу комбинации гибридной силовой установки транспортного средства; при разрядке аккумулятора включается в работу СПГЭ, который в свою очередь подзаряжает аккумулятор и вырабатывает электроэнергию. При увеличении потребностей в электроэнергии питание осуществляется от аккумулятора и работающего СПГЭ.

Однако, следует признать при всех очевидных преимуществах (например, снимается проблема запуска свободнопоршневого энергоблока) сложность практической реализации подобной системы. По этой причине в большинстве свободнопоршневых энергоустановок наряду с микропроцессорной системой управления, в частности, реализованной в свободнопоршневом электрогенераторе фирмы "Monthelec" (рис.1.18), применяется система воздушного запуска с воспламенением топливоздушнoй смеси от сжатия (по такому принципу работают дизель-молоты рис.1.14).

Наряду с исследованием свободнопоршневых энергоустановок и неоспоримыми их преимуществами (отсутствие боковых нагрузок поршня на цилиндр, возможность изменения амплитуды относительных перемещений поршня) возникает задача создания энергоустановки, обеспечивающей возможность использования циклического движения поршня при однонаправленном вращении выходного вала установки, с сохранением всех (или частично) преимуществ свободнопоршневого механизма.

4.5. Поиск принципиальных схем линейных ДВС с однонаправленным вращением выходного вала

Как уже говорилось ранее, свободнопоршневые двигатели отличаются существенной простотой конструкции, отсутствием боковых нагрузок поршня на цилиндр, автоматическим изменением степени сжатия. Однако использование традиционного кривошипно-ползунного механизма для преобразования энергии горения топлива в механическую энергию однонаправленного вращения выходного вала приводит к ограничению свободного хода поршня.

Вследствие этого предложены два варианта замены кривошипно-ползунного механизма в линейном двигателе:

1. Комбинирование свободнопоршневого двигателя с линейным генератором электроэнергии (ранее рассмотренные варианты рис.4.6, рис.4.14).
2. Синтезирование механизмов, исключающих некоторые из недостатков кривошипно-ползунного механизма.

Основной задачей при конструировании новых механизмов преобразования возвратно-поступательного движения поршня во вращательное выходного вала является стремление сохранить преимущества свободнопоршневой установки. Если термодинамика изучает процессы преобразования энергии в надпоршневом пространстве при прямом и обратном перемещении поршня, то механика исследует процесс преобразования этой энергии в механическую энергию вращения выходного вала.

Для плоских механизмов, к которым относится и кривошипно-ползунный механизм, вышеперечисленные требования трудновыполнимы. Установка же двух соосных валов, вращающихся в разные стороны (рис.4.14), даёт возможность в широком диапазоне изменять характер закона движения поршня. К тому же такое конструкторское решение исключает нормальные нагрузки поршня на цилиндр и даёт возможность варьировать степень сжатия в цилиндрах. Можно добиться передачи крутящего момента выходному валу по кривой, не соответствующей круговой траектории.

С использованием известных конструкторских решений [32, 64, 80] предложены технические решения по вариантам двигателей летательных аппаратов, сохраняющих основные преимущества СПМ, с однонаправленным вращением выходного вала. На рис.2.10 и рис.4.14 приведены соответственно структурная и принципиальная схема одного из вариантов преобразователей возвратно-поступательного движения поршня, на который подана заявка на выдачу патента [24].

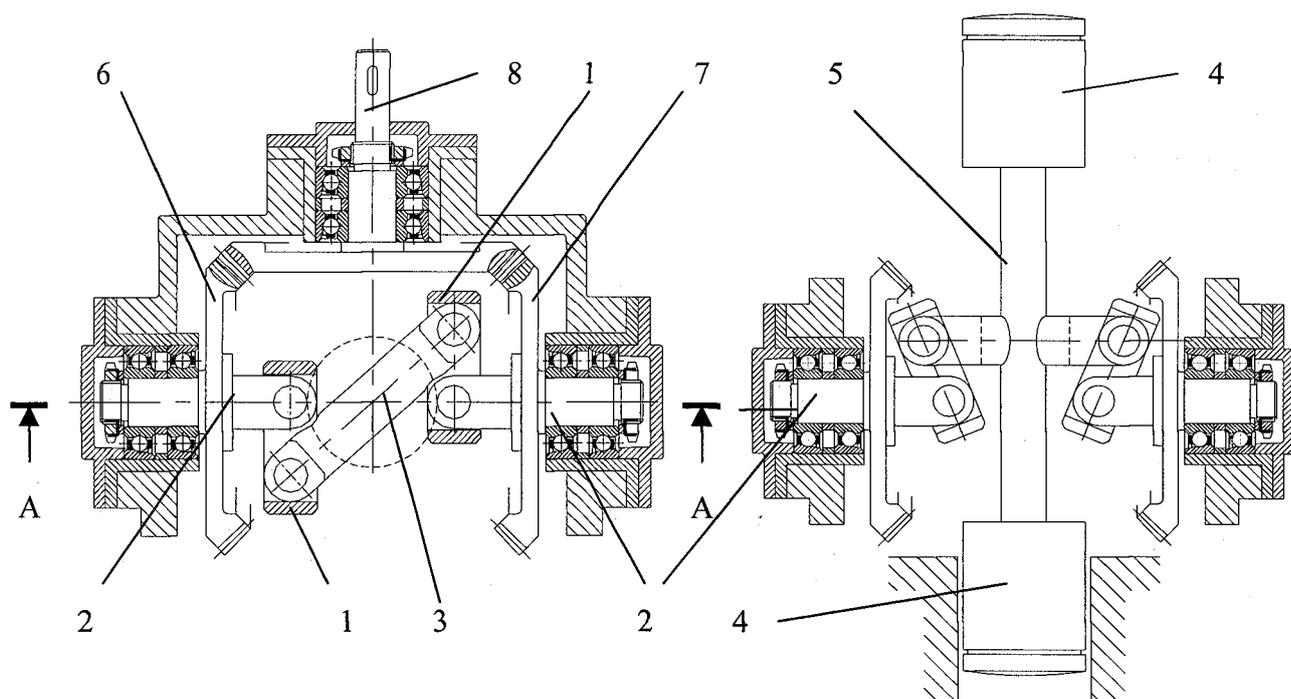


Рис.4.14. Принципиальная схема механизма преобразования возвратно-поступательного движения поршня в однонаправленное вращение выходного вала

Кривошипно-ползунный механизм, содержащий два качающихся шатуна 1, один конец которых подвижно соединён цилиндрическими шарнирами с кривошипными валами 2, синхронно вращающимися в противоположные стороны. Другие концы кривошипов соединены между собой через сферические шарниры общей штангой 3. При синхронном вращении кривошипных валов в противоположные стороны два шатуна совершают синхронное возвратно-качательное движение относительно цилиндрических шарниров в плоскости, перпендикулярной плоскости вращения кривошипных валов. При этом центральная точка оси штанги будет совершать строго возвратно-прямолинейное

движение нормально к оси кривошипных валов из положения верхней мёртвой точки к нижней мёртвой точки и обратно.

Первая отличительная особенность рассматриваемого механизма заключается в том, что, соединив неподвижно центральную точку штанги 3 с поршнем 4 при помощи штока 5, можно создать ДВС без боковой нагрузки поршня на цилиндр, свойственной двигателям традиционных схем. Отметим, что все остальные точки штанги совершают возвратно-винтовое движение по образующей цилиндра, осью которого является прямолинейная траектория перемещения центральной точки штанги.

Для осуществления синхронного вращения кривошипных валов в противоположные стороны в представленном устройстве предусмотрен механизм синхронизации, включающий две конические зубчатые шестерни 6 и 7, установленные и зафиксированные на кривошипных валах. Указанные шестерни находятся в зацеплении с выходным коническим зубчатым колесом 8, ось вращения которого нормально пересекает ось кривошипных валов и траекторию перемещения центральной точки штанги.

Вторая отличительная особенность предложенного механизма заключается в том, что с вала зубчатого колеса 6 осуществляется съём мощности (крутящего момента), что позволяет уменьшить крутильные колебания кривошипных валов, возникающих от нестабильности момента сопротивления их вращению. Кроме того механизм синхронизации, в зависимости от назначения ДВС, может выполнять функции либо редуктора, либо мультипликатора, которые будут определяться диаметрными размерами шестерён 6, 7 и зубчатого колеса 8.

Третья отличительная особенность предложенного механизма заключается в том, что, в зависимости от назначения ДВС (низкооборотный, высокооборотный), проекция траектории кривошипного пальца на плоскость, перпендикулярную оси вращения кривошипных валов, может существенно отличаться от круговой траектории.

Четвёртая отличительная особенность - возможность изменения хода поршня, в процессе работы механизма, путём совместного перемещения кривошипных валов вдоль оси.

Для данного механизма рис.4.14 ещё раньше нами была выбрана расчётная кинематическая схема (рис.2.11а) и основная кинематическая модульная модель (рис.2.11б), соответствующая модулю Пр14, для которого методом обращения получены решения (табл.2.18), с параметрической формулой на рис.2.11в.

В процессе динамического синтеза с использованием векторных моделей определены для различных наборов кинематических, массовых и нагрузочных параметров диаграммы перемещений, скоростей, ускорений (рис.4.15а, б, в).

Отличительная особенность данного механизма - широкое изменение закона движения поршня, связанное с выбором параметров звеньев r_1 , r_2 , r_3 рис.2.11б (кривая 1 рис.4.15 соответствует круговой траектории кривошипного пальца традиционного кривошипно-ползунного механизма).

Теоретические исследования функционирования предлагаемого механизма в составе поршневого авиационного ДВС показывают, что при одном и том же ходе поршня и располагаемой энергии надпоршневого пространства эффективность использования этой энергии, направленной на создание крутящего момента на выходном валу, существенно различна и зависит от размеров звеньев механизма. При этом у механизма с законом движения поршня, соответствующим кривой 2 рис.4.15, увеличивается эффективность, а вследствие меньшей угловой скорости вращения выходного вала, повышается надёжность работы всех кинематических пар и редуктора, а также уменьшаются габариты редуктора и его вес.

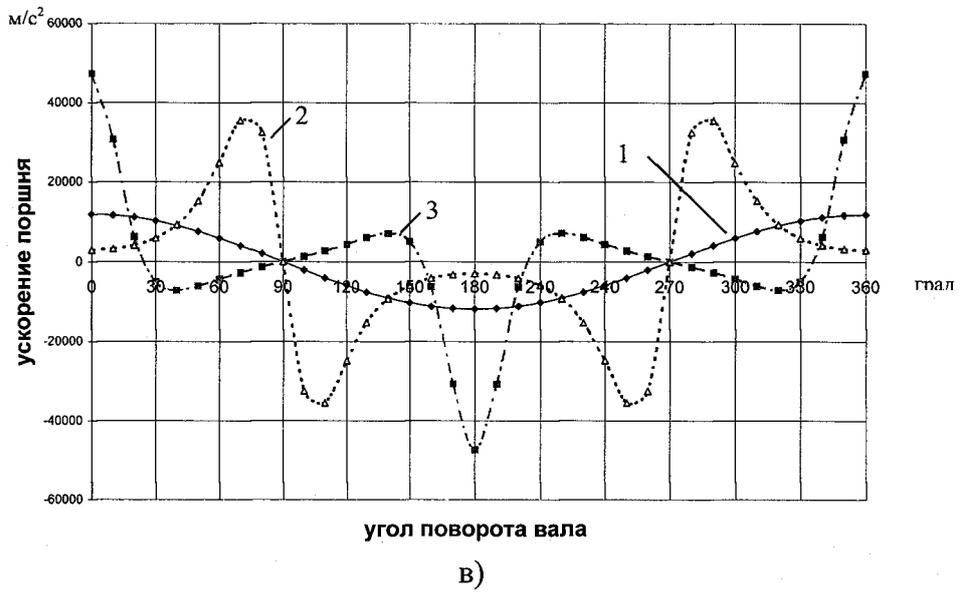
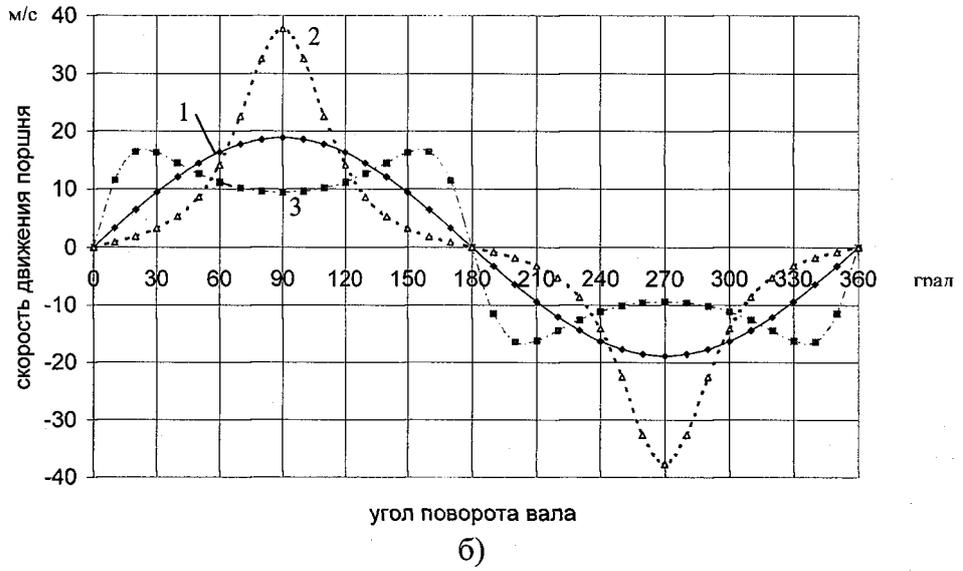
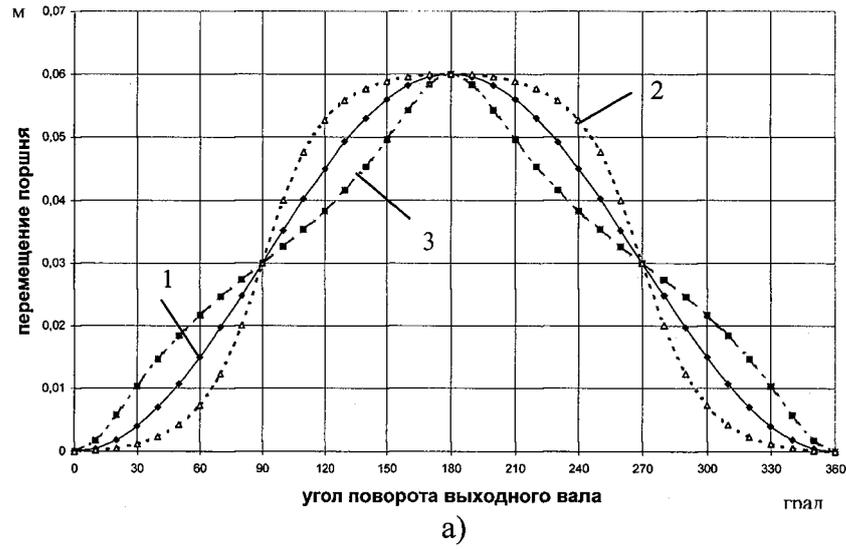


Рис.4.15. Диаграммы перемещения (а), скорости (б) и ускорения (в) поршня при различных параметрах звеньев

Дальнейшие исследования в данном направлении ориентированы на поиск более простых и технологичных структур. Так были получены результаты по композиции свободнопоршневых энергоустановок вращательного движения, то есть генераторов крутящего момента с приводом от линейного ДВС. Сохранив все преимущества СПМ, обеспечена возможность использования нерегулярного циклического движения поршня при однонаправленном вращении выходного вала установки.

Предложены варианты свободнопоршневых энергоустановок (рис.4.16), теоретически удовлетворяющие условиям поставленной задачи (сохранение преимуществ СПМ).

Принцип работы: поршень 1, совершая возвратно-поступательное движение в цилиндре 2, передаёт вращательное движение гайке-муфте 3, которая фрикционно, взаимодействуя с муфтами свободного хода 4, передаёт крутящий момент выходному валу 5.

Принципиальное отличие преобразователей возвратно-вращательного движения поршня во вращение выходного вала, приведённых на рис.4.16в от аналогичных устройств рис.4.16а, рис.4.16б состоит в однонаправленном вращении поршня при дополнительном вращении корпуса.

Практическая реализация предложенных технических решений, отличающихся новизной и полезностью, возможна по результатам более детального изучения динамических процессов циклической работы соединительных муфт.

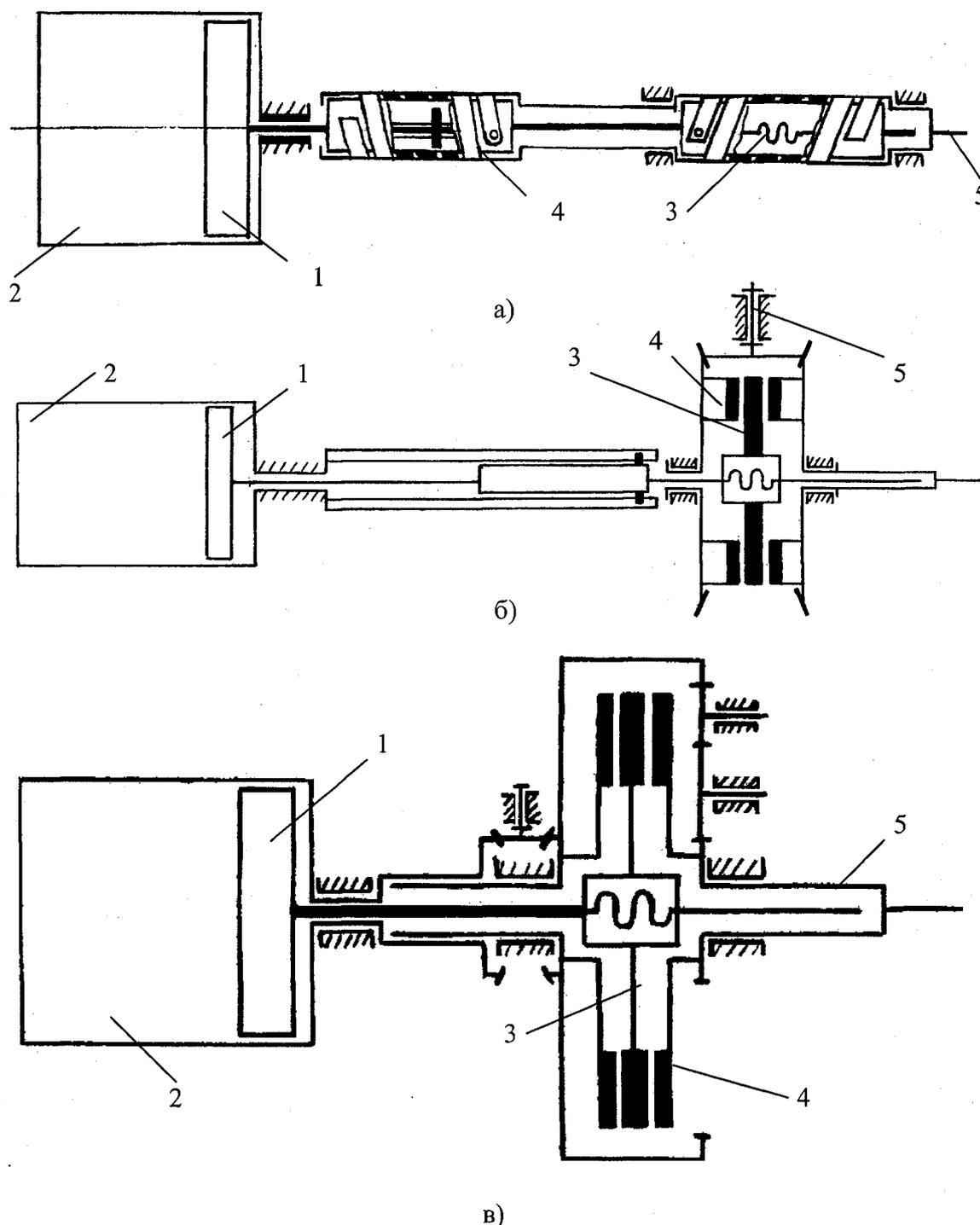


Рис.4.16. Свободпоршневые механизмы, с преобразованием возвратно-поступательного движения поршня 1 в однонаправленное вращение выходного вала 5

Таким образом, полученные ранее теоретические результаты и предложенная методика позволяют значительно расширить возможности поискового проектирования, особенно на начальных этапах создания изделия.

Заключение по четвёртой главе:

1. Показано практическая применимость предложенного метода к задачам композиции свободнопоршневых энергоблоков.
2. Сформулированы требования к микропроцессорной системе управления свободнопоршневым электрогенератором.
3. Найдены оригинальные механизмы ДВС с однонаправленным вращением выходного вала, сохраняющим основные достоинства свободнопоршневого механизма.
4. Предложенная методика может быть рекомендована для широкого практического внедрения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования композиции свободнопоршневых энергоустановок доказывают возможность их применения в качестве основной или гибридной силовой установки как на авиационных, так и на других видах транспортных средств. Опыт инициативных исследований по эскизному проектированию вспомогательной аварийной бортовой электростанции, энергоблоков перспективных летательных аппаратов свидетельствует о практической ценности предложенной методики.

Особенностью настоящего исследования является повышенный практический интерес к структурному синтезу перспективных механизмов. По этой причине проведён анализ структурно-конструктивных вариантов совмещённых кинематических пар и получены аналитические решения для пространственных модулей, представляющих интерес для синтеза механизмов преобразователей движения.

В рамках настоящего исследования аналитика кинематических и динамических моделей является вспомогательным аппаратом, позволяющим провести сравнительный анализ совершенства исследуемых вариантов структур, проектируемой энергоустановки.

Предложенный подход к созданию динамических моделей на основе методики композиции свободнопоршневых энергоустановок допускает дальнейшее их развитие. При более глубоком анализе вариантов конструкции создаваемого механизма развитие этих моделей позволяет оценить процессы трения, газообмена, влияние температурных факторов и т.д.

Результаты исследований использованы в учебном процессе на кафедре "Основы конструирования машин" Самарского государственного аэрокосмического университета.

Общие выводы по результатам проведённого исследования могут быть сформулированы следующим образом:

1. Создана структурно-конструктивная классификация трёхзвенных совмещённых подвижных соединений, расширяющая возможности поискового конструирования свободнопоршневых энергоустановок.
2. Получены аналитические решения всех пространственных модулей, расширяющие возможности моделирования механизмов авиационных двигателей.
3. Предложено обобщённое описание свободнопоршневых машин, обеспечивающее единый методический подход к оценке кинематических и динамических характеристик свободнопоршневых энергоустановок.
4. Создана методика композиции свободнопоршневых энергоустановок на основе сравнительной оценки кинематических и динамических характеристик возможных вариантов, повышающая эффективность поискового проектирования перспективных энергоблоков.
5. Синтезированы механизмы свободнопоршневых электрогенераторов, отличающиеся по сравнению с известными более простой конструкцией и технологичностью.
6. Предложен подход к созданию двигателей внутреннего сгорания с вращением выходного вала, обеспечивающий повышение технических характеристик.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Авдеев К.А. Разработка математической модели, исследование функционирования и построение методики проектировочных расчётов быстроходного дизель-молота. Автореферат. Тула, ТГУ, 2000. 20с.
2. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. М.: Машиностроение, 1992.
3. Артоболевский Т.И., Левицкий Н.И., Черкудинов С.А. Синтез плоских механизмов. М.: Физматгиз, 1959.
4. Баландин С.С. Бесшатунные двигатели внутреннего сгорания. М.: Машиностроение, 1972. 176 с.
5. Балдин С. Воздухоплавательные двигатели. С.-Петербург: Типография Усманова, 1910.
6. Баранов Г.Г. Курс теории механизмов и машин. М.: Машиностроение, 1967.
7. Берковский Б. "Солнечный путь" к экономическому развитию и охране окружающей среды / Теплоэнергетика. 1996. №5.
8. Быков А.В., Калнинь И.М., Крузе А.С. Холодильные машины и тепловые насосы. М.: Агропромиздат, 1988.
9. Велиев В.Д. Система пневматического пуска бескомпрессорного свободнопоршневого генератора газа // Двигатели внутреннего сгорания. М., 1973, вып.80, с 70-75.
10. Вольных В.И., Мут А.Ф., Сбоев В.М. Некоторые вопросы исследования рабочего цикла свободнопоршневого дизель-гидронасоса на режимах номинальных нагрузок. Характер изменения степени сжатия // Труды Челябинского института механизации и электрофикации сельского хозяйства. 1967, вып.28, с 257-262.
11. Гавриленко В.А., Минус С.Б., Мусатов А.К. и др. Теория механизмов. М.: Высш. школа., 1973.
12. Голубева О.В. Теоретическая механика. М.: Высшая школа, 1976. 350с.

13. Гомелаури В.И., Везиришвили О.Ш. Опыт разработки и применения теплонасосных установок / Теплоэнергетика, 1978, №4.
14. Гурьянов В.В. Основные направления научно-технического прогресса в топливных отраслях промышленности / Теплоэнергетика. 1994. №11.
15. ДВС с переменной степенью сжатия. Французский патент. F02d17/00, F02^{d22}/00, №2102430, заявлен 3.09.70.
16. Дельнов Ю.Ф., Вороновицкий В.Я., Гринман М.И. и др. Транспортабельная энергетическая установка малой мощности на геотермальных источниках / Энергетическое строительство. 1994. №2.
17. Демидович Б.П. Численные методы анализа. М.: Наука, 1967. 368с.
18. Детали машин. Расчёт и конструирование: Справочник / Под ред. Н.С. Ачеркина. М.: Машиностроение, 1968. Кн.1.
19. Дизели. Справочник. Изд. 3-е, перераб. И доп. Под общей редакцией В.А. Ваншейдта, Н.Н. Иванченко, Л.К. Коллерова. Л.: Машиностроение, 1977. 480 с.
20. Двухходовой двигатель внутреннего сгорания имеет всего лишь одну подвижную деталь // Изобретатель и рационализатор. 1990. №3. с.44.
21. Довгялло А.И., Лукачёв С.В. Сильфонные тепловые, холодильные и компримирующие машины. Самара: СГАУ, 1998. 96с.
22. Харитонов Е.М., Попов В.Н. Исследование характеристик изменения степени сжатия свободнопоршневого дизель-гидронасоса // Труды Челябинского института механизации и электрофикации сельского хозяйства.
23. Ермаков А.И. Инерционный двигатель комбинированный, электродвигатель и преобразователь. F02B71/04 № 98122901/06, заявлен 1998.12.18.
24. Заявка на патент РФ №2000121892, МКИ^б: F01B 11/00 Механизм преобразования движения / Б.П. Семенов, Д.В. Герасимов. Заявлено 30.08.2000.
25. Заявка на патент РФ №2000121893, МКИ^б: F01B 11/00 Свободнопоршневой генератор / Б.П. Семенов, Д.В. Герасимов. Заявлено 30.08.2000.
26. Зысин В.А. Комбинированные парогазовые установки и циклы. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962.

- 27.Ишлинский А.Ю. Механика относительного движения и силы инерции. М.: Наука, 1981. 320 с.
- 28.Карло Ля Порта. Возобновляемые виды энергии: последние коммерческие успехи в США и перспективы в будущем / Обзор инф. Науч. и техн. аспекты охраны окружающей среды. ВИНТИ. 1995. № 2.
- 29.Квашенников В.В. Двухтактный аксиальный двигатель. F02B71/04, №98118117/06, заявлен 1998.10.02.
- 30.Кидина Г.Н. К вопросу о влиянии степени сжатия на относительный КПД быстроходного дизеля // Двигатели внутреннего сгорания. 1970, вып.11, с.59-66.
- 31.Кожевников С.Н., Есипенко Я.И., Раскин Я.М. Механизмы. М.: Машиностроение, 1965. 1057 с.
- 32.Колчин А.И., Демидов В.П. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: Учеб. Пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1980. 400 с.
- 33.Корнилов К.Э. Топливоэлектрический преобразователь. F02B71/04, №98120588/06, заявлен 1998.11.10.
- 34.Коршунов А.П. О роли возобновляемых источников энергии в энергообеспечении сельского хозяйства / Энергетическое строительство. 1995. № 5.
- 35.Косенок Б.Б. Синтез модульных векторных моделей при проектировании устройств механизации крыла летательных аппаратов. Автореферат, Москва: 1996.
- 36.Крайнев А.Ф. Механика машин. М.: Машиностроение, 1999.
- 37.Кривоногов Б.М. Повышение эффективности сжигания газа и охрана окружающей среды. Л.: Недра, 1986. 280 с.
- 38.Круглов М.Г., Меднов А.А. Газовая динамика комбинированных двигателей внутреннего сгорания. М.: Машиностроение, 1988. 360 с.
- 39.Кудрявый В.В. Электроэнергетика: наука, экономия, энергосбережение / Энергетик, 1995. № 4.
- 40.Кузнецов Н.Ф. Микрокриогенный охладитель. F25B9/00, №93048740/06, заявлен 1993.10.22.

41. Кустарев Ю.С., Кузнецов В.В., Родькин К.П. Применение энергоаккумулирующих веществ в качестве альтернативного экологически чистого топлива для, транспортных и энергетических ГТУ / Научная конференция по проблемам экологии. Тезисы докладов и сообщений. М.: МАДИ, 1995.
42. Левитский Н.И. Теория механизмов и машин: Учебное пособие для вузов. М.: Наука, 1990. 592с.
43. Лойцянский Л.Е. Механика жидкости и газов. М.: Наука, 1970. 847с.
44. Лукачѐв С.В. Основы рабочего процесса и характеристики ДВС: Учебное пособие. Куйбышев: КуАИ, 1987. 76с.
45. Мартыновский В.С. Циклы, схемы и характеристики термотрансформаторов / Под ред. В.М.Бродянского. М.: Энергия, 1979.
46. Марченко Р.В. Генератор электротока с приводом от двигателя внутреннего сгорания. F02B71/04, № 98112654/06, заявлен 1998.06.26.
47. Махалдиани В.В., Меонидзе А.М. Двигатели внутреннего сгорания с автоматическим регулированием степени сжатия. Тбилиси: Мецниереба, 1973. 269с.
48. Мацкерле Ю. Автомобильные двигатели с воздушным охлаждением. М.: Машиностроение, 1977. 232с.
49. Машины, работающие по циклу Стирлинга. М.: Энергия, 1978. 152с.
50. Мерзликин В.Е. Микродвигатели серии ЦСТКАМ. М.: Патриот, 1991, 167с.
51. Мехонцева Д.М. Динамическое исследование машинного агрегата: Учеб. пособие. Красноярск: КГУ, 1986. 240с.
52. Миклос А.Г., Чернявская Н.Г., Червяков С.П. Судовые двигатели внутреннего сгорания. Л.: Судостроение, 1986. 360 с.
53. Мут А.Ф. Исследование изменения цикличности свободнопоршневого двигателя // Труды Челябинского института механизации и электрофикации сельского хозяйства. 1972., вып.54, с170-175.
54. Муфазалов Ф.Ш. Электродвигатель-компрессор, H02K33/12, №5048412/07, заявлен 1992.06.17

55. Нейман Л.Р., Демирчан, К.С. Теоретические основы электротехники. т.1 Л.: Энергия, 1967. 517с.
56. Орлин А.С. Круглов М.Г. Двигатели внутреннего сгорания: Устройство и работа поршневых и комбинированных двигателей. М.: Машиностроение, 1980. 570 с.
57. Орлин А.С. Теория рабочих процессов поршневых и комбинированных двигателей. М.: Машиностроение, 1971. 398с.
58. Пармон В.Н., Бурдуков А.П., Беляев Л.С. и др. Малая энергетика и нетрадиционные источники энергии: их роль и место в энергетике Сибири в ближайшие годы и на перспективу. Малая энергетика / Рос. хим. ж. 1994. Т. 38. №3.
59. Пенно Г.Ф., Сбоев В.М. Пневматическое устройство для стабилизации степени сжатия свободнопоршневого двигателя // Труды Оренбургского сельскохозяйственного института. 1971, вып. 27, с.43-46.
60. Пинский Ф.И. Свободнопоршневой двигатель внутреннего сгорания с линейным электрическим генератором переменного тока. F02B71/04, №99105110/06, заявлен 1999.03.16.
61. Пожбелко В.И., Ахметшин Н.И., Лившиц В.А. Методы решения задач синтеза механизмов. Учебное пособие. Челябинск: ЧГТУ, 1993. 94с.
62. Проблемы надёжности и ресурса в машиностроении / Под. ред. К.В. Фролова, А.П. Гусенкова. М.: Наука, 1986. 247с.
63. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник / Под. ред. И.А. Биргера. М.: Машиностроение, 1968. Т.2. 227с.
64. Райков И.Я., Рытвинский Г.Н. Конструкция автомобильных и тракторных двигателей. М.: Высш. школа, 1986. 352с.
65. Руденко Н.Ф. Планетарные передачи. М.-Л.: 1947.
66. Сампауэр Ой. Устройство для запуска свободнопоршневого двигателя с помощью гидравлической системы. F02B71/02, №5001956/06, заявлен 1991.11.13.

67. Семёнов Б.П., Косенок Б.Б. Композиция механизмов механизации крыла летательного аппарата / Известия вузов. М.: Высшая школа, 1997.
68. Семёнов Б.П., Тихонов А.Н., Косенок Б.Б. Модульное моделирование механизмов. Самара: СГАУ, 1996.
69. Те Геня. Линейный двигатель внутреннего сгорания. F02B75/24, № 5054697/06, заявлен 1992.07.15.
70. Техническая термодинамика. Учебник для вузов / Под ред. В.И. Крутова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. Школа, 1981.
71. Угаров Г.Г. Линейный электромагнитный двигатель. H02K33/02, №93056461/07, заявлен 1993.12.20.
72. Уокер Г. Двигатели Стирлинга / Сокр. пер. с англ. Б.В. Сутугина и Н.В. Сутугина. М.: Машиностроение, 1985. 408 с.
73. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики. М.: Техничко-техническая литература, 1956. 563с.
74. Фролов К.В. Уменьшение амплитуды колебаний резонансных систем путём управляемого изменения параметров // Машиностроение. 1965. №3. с38-42.
75. Харитонов С.А. Принципы построения и расчета систем генерирования постоянного и переменного тока для ветроэнергетических установок и подвижных автономных объектов / Науч. техн. конференция с междунар. участием "Электротехн. систем трансп. средств и их роботизир. пр-в". Суздаль, 1995.
76. Хасебе Шигета. Двигатель с магнитным приводом. H02K1/00, №93004958/07, заявлен 1993.02.02.
77. Хищрин Л.Н. Физика горения и взрыва. М.: изд. Московский университет, 1957. 442 с.
78. Холодильные установки / Чумак И.Г., Чепурненко В.П. и др.; Под ред. д-ра техн. наук, проф. И.Г. Чумака. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1991.
79. Чегодаев Д.Е., Мулюкин О.П. Элементы клапанных устройств авиационных агрегатов и их надёжность: Учебное пособие. М.: МАИ, 1994. 208с.

- 80.Чернох С. Справочник по машиностроению. М.: Машиностроение, 1964.
- 81.Эрдеди А.А., Эрдеди Н.А. Техническая механика. Детали машин: Учеб. для машиностр. спец. техникумов. М.: Высш. шк., 1992. 272 с.
- 82.Ярославцев М.И. Линейный индукторный двигатель. Н02К41/03, №5057203/07, заявлен 1992.06.15.
- 83.Carl Linde, "Process and Apparatus for Attaining Lowest Temperatures for Liquefying Gases, and for Mechanically Separating Gas Mixtures," *The Engineer*, pp. 485-6, Nov. 13, 1896 and p. 509, Nov. 20, 1896.
- 84.Elsasser W.M. "The Earth as a Dynamo," *Scientific American*, p. 44-48, May 1958.
- 85.Freikolbenmotor "Rectilinéaire" / Autotechnik №43, 1980.
- 86.Measurements were made by M. King and O. Nicholson at Eyring, Inc., with a HP 3577A network analyzer on 3 inch diameter coils with 43 turns each of number 20 wire.
- 87.Michael Pupin, *From Immigrant to Inventor*, Charles Scribner's Sons N.Y., 1930. 285-286 pp.
- 88.Model of TRTC Stirling engine with adiabatic working space// Renflor D.A., Count M.// Trans. ASME. J. Eng. Gas Turbines and Power.. 1988. 110, № 4. 658 - 663 pp.
- 89.Nikola Tesla, "The Problem of Increasing Human Energy - Through Use of the Sun's Energy," *The Century Illustrated Magazine*, reprinted in *LPA*, p. A-140.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Программа расчёта свободнопоршневой энергоустановки

```

{main-главная}
uses Crt, elekt, teplot;

const eo=5; en=21; de=1; Pi=3.1415926;
label 1,2;

var nkV,m,e,alf,Ph,Th,Hu,l0,L1,G1,M1,MCO2,MH2O,MN2,MCO,MH2,M2,dM,m0,
    Nue,Num,md,gi,ge,Vh,Nui,Ni,Ne,Tz,tbc,Tb,lm,Pc,ed,Pm,Pe,Vp,fi,
    gm,n1,n2,pci,Tr,Pr,dT,Tk,Sk,Pa,Ta,Pb,NUV,Tc,Nel,GT,Pz,PZ1,Pk,Pis,Sp,Tkr,

    Dpor,Sh,Spor,S1,S2,S3,S4,S5,S6,S7,Vpor,T,Wpor,Wpor1,Mpor,Psum,Sqpor,
    Pw,Pin1,Pin2,Skk,kkk,stp,

    shag,nnl,TT,z,FFpp,Ii,E1,E2,N,hz,T1,Wsr,dn
                                : real;
    p,pp,f,ff,fff : text;
    x,g,i,j : integer;
    Tm1,Tm2 : array [1..200] of real;

procedure PressKey;
var ch : char;
begin Writeln('          Нажмите любую клавишу !'); ch:=ReadKey;
end;

begin

    ClrScr;
    { Write('Давление окружающей среды(0.101325), МПа          Ph =');read (Ph);
      Write('Температура окружающей среды, град.С          Th =');read (Th);}
    PressKey;

begin

    Ph:=0.1;          Dpor:=0.015{*sqrt(1.5){}};          Mpor:={2*}0.066;
    Th:=20;          g:=100;          Sp:=0.029{/1.5{}};

    nkV:=1000;

    e:=eo;
    while e<=en do begin

1:  dn:=1000;
    while dn>=100 do begin

TEPLOTEHNIKA(Ph,Th,e,nkV,Dpor,Sp,
    alf,Hu,l0,M1,MCO2,MCO,MH2,PZ1,Nue,Num,md,gi,ge,Vh,Nui,Ni,Ne,Pin,
    MH2O,MN2,M2,dM,m0,Tz,tbc,Tb,lm,Pc,ed,Pm,Pe,Vp,gm,n1,n2,Tr,Pis,
    Pr,dT,Tk,Sk,Pa,Ta,NUV,Tc,Nel,GT,Pz,Pk,Pb,Tkr,pci,Sh );

begin

    Spor:=0;  stp:=1000000;
    S1:=0.035*Sh; S2:=Sh*(1-pci); S3:=Sh*(1-pci/2); S4:=Sh;
    S5:=Sh*(1-pci); S6:=Sh*0.035; S7:=0;  shag:=Sh/g;
    Sqpor:=Dpor*Dpor*3.1415926/4;
    kkk:=-Ln(exp(n1*Ln(ed))*exp(1/3*Ln(lm)))/Ln(ed);
    Pz:=Pz*stp; Pz1:=Pz1*stp; Pc:=Pc*stp; Pa:=Pa*stp; Pb:=Pb*stp;

```

```

i:=1; j:=g+1;
while i<=g do begin
  Skk:=1/(1+Spor*(ed-1)/Sh/(1-pci));

  if Spor<=S1 then begin
    Pin1:=(Pz-Pc*exp(1/3*Ln(lm)))/S1*Spor+Pc*exp(1/3*Ln(lm)); end;

  if Spor<=S2 then begin    if Spor>S1 then begin
    Pin1:=Pz1*exp(n2*Ln(Skk)); end; end;

  if Spor<=S3 then begin    if Spor>S2 then begin
    Pin1:=Pb+(Pb-Pa)*2/pci*(1-pci)-2*(Pb-Pa)/Sh/pci*Spor; end; end;

  if Spor<=S4 then begin    if Spor>S3 then begin
    Pin1:=Pa; end; end;

  Tm1[i]:=Pin1; Tm2[j]:=Pin1;
  i:=i+1; j:=j+1; Spor:=Spor+shag;
end;

j:=1; Spor:=Sh;
while i<=2*g do begin    Skk:=1/(1+Spor*(ed-1)/Sh/(1-pci));

  if Spor>=S5 then begin    Pin2:=Pa; end;

  if Spor>=S6 then begin    if Spor<S5 then begin
    Pin2:=Pa*exp(n1*ln(ed*Skk)); end; end;

  if Spor>=S7 then begin    if Spor<S6 then begin
    Pin2:=Pa*exp(kkk*ln(ed*Skk)); end; end;

  Tm1[i]:=Pin2; Tm2[j]:=Pin2;
  i:=i+1; j:=j+1; Spor:=Spor-shag;
end;

j:=1; i:=1; fi:=0; Spor:=0; Vpor:=0; T:=0; TT:=0;
z:=Sh/2; Wpor1:=0;
while i<=g+1 do begin

  Psum:=(Tm1[i]-Tm2[j])*Sqpor;
  Wpor:=Psum/Mpor;
  Pw:=-Mpor*Wpor;
  Wsr:=(Wpor+Wpor1)/2;

  T:=(-Vpor+sqrt(ABS(Vpor*Vpor+2*Wsr*(shag))))/Wsr; Vpor:=Vpor+Wsr*T;
  if i=1 then Vpor:=0;
  if i=g+1 then Vpor:=0;

ELEKTR(Dpor, Spor, Sh, Vpor, g, i, E1, E2, z, hz, FFpp, Ii, N);

WriteLn(вывод результатов на печать кинематических характеристик);

  j:=j+1; i:=i+1; fi:=fi+1; Spor:=Spor+shag; TT:=TT+T; Wpor1:=Wpor;
  z:=z-hz;

end;

TT:=TT-T;
nn1:=30/TT;

Close(f); Close(ff); Close(fff);

```

```

end;

dn:=ABS(nm1-nkv);
nkV:=nm1;

end;
{   PressKey; ClrScr;}

if x=1 then goto 2
    else e:=e+de;
end;

e:=e-de; x:=x+1;
if x=1 then begin
    ClrScr;
    PressKey;
    goto 1;
end;

2: WriteLn(вывод результатов на печать телотехнических характеристик);

end;
end.

{подпрограмма расчёта телотехнических характеристик}
unit TEPL0T;
interface
Procedure TEPL0TEHNIKA(Ph, Th, e, nkV, Dpor, Sp: real;
var   alf, Hu, l0, M1, MCO2, MCO, MH2, PZ1, Nue, Num, md, gi, ge, Vh, Nui, Ni, Ne, Pin,
    MH2O, MN2, M2, dM, m0, Tz, tbc, Tb, lm, Pc, ed, Pm, Pe, Vp, gm, n1, n2, Tr, Pis,
    Pr, dT, Tk, Sk, Pa, Ta, NUv, Tc, Nel, GT, Pz, Pk, Pb, Tkr, pci, Sh : real );

var i, F2F, Sx, Ax, Am, Bx, X1, X2, Uz1, Uz2, L1, G1, kc, k,
    fig, d1, H, Dx, DHu, pci, ez, uc1, uc2, Pin, Pis : real;
implementation
Procedure TEPL0TEHNIKA;

const   ln10=2.30259;
        Mt=115;          gc=0.855;          go=0;          gs=0;
        R=287.12;       tau=2;             gh=0.145;
        m=2;            fim=0.85;

begin   alf:=0.85; pci:=0.4; k:=1.4; Dpor:=0.015;

        Sh:=Sp*(e-1)/(e+1); {e=14, Sh=25.133мм, pci:=0.3}
        pci:=(2*pci*Sh+(Sh-Sp))/(2*Sh);

        Th:=273.15+Th;
        Hu:=(33.91*gc+125.60*gh-10.89*(go+gs)-2.51*9*gh)*1000;
        l0:=(1/0.232)*(8*gc/3+8*gh-go);   L1:=(1/0.209)*(gc/12+gh/4-go/32);
        G1:=alf*l0+1;
        M1:=alf*L1+1/Mt;   MCO:=2*(1-alf)*0.209*L1/1.5;
        MCO2:=gc/12-MCO;  MH2:=0.5*MCO;
        MH2O:=gh/2-MH2;   MN2:=0.791*alf*L1;
        M2:=MCO2+MH2O+MCO+MN2+MH2;   dM:=M2-M1;   m0:=M2/M1;
        Pk:=Ph;
        Tk:=Th*exp(Ln(Pk/Ph)*(k-1)/k);
        Tr:=0.01667*nkv+850;
        Pa:=Pk-0.0000007429*exp(Ln(nkv)*1.1);
        Pr:=Pa;

```

```

dT:=42000/(1400+nkv);
Sk:=Pk*1000000/(R*Tk);
ed:=e*(1-pci)+pci;
fig:=0.00108*exp(Ln(nkv)*(4/7))+0.93;
{ gm:=4*(tk+dt)/tr*pr/(fig*ed*pa-4*pr)+nkv/4000000;}
gm:=0.3;
kc:=1+0.0001373*exp(Ln(Tr-800)*1.1);
Ta:=(Tk+dT+kc*gm*Tr)/(1+gm);
NUV:=fig*ed*Pa/((ed-1)*Pk)*Tk/(Tk+dT+kc*gm*Tr);

Pa:=Pa*exp(1.4*Ln(fig));
Ta:=Ta*exp(0.4*Ln(fig));

ez:=0.75+0.00106066*sqrt(nkv);
n1:=-0.001*ed+(1.437-0.00015*Ta);
Pc:=Pa*exp(ln(ed)*n1);
Tc:=Ta*exp(ln(ed)*(n1-1))-273.15;
md:=(M2+M1*gm)/(M1*(1+gm));
Uc1:=(20.6+0.002638*Tc)*Tc;
F2F:=0.293057*sqr(Ln(100+Tc)/ln10)*sqrt(Ln(100+Tc)/ln10)*exp(Ln(1-alf)*1.1201);
Uc2:=30.704-0.000010863*exp(Ln(3000-Tc)*1.701-F2F)*Tc;
DHu:=Hu-114000*(1-alf)*L1;
Am:=ez*DHu/(M1*(1+gm))+(Uc1+gm*Uc2)/(1+gm);
Uz2:=Am/md;

Ax:=(Mco2*0.003349+Mh2o*0.004438+Mn2*0.001457+Mh2*0.001758+MCO*0.00143)/M2;
Bx:=(Mco2*39.123+Mh2o*26.67+Mn2*21.951+Mh2*19.678+MCO*22.49)/M2;
Dx:=sqrt(Bx*Bx+4*Ax*Uz2);
X1:=(-Bx+Dx)/2/Ax;
Tz:=X1+273.15;

Pz1:=Pc*md*Tz/(Tc+273.15);
Pz:=fim*Pz1;
n2:=112.67/(87.88+Tz/1000)+0.0031213*sqrt(ed)-0.045*(alf-1);
lm:=Pz1/Pc;
Pb:=Pz1/(exp(ln(ed)*n2));
Tb:=Tz/(exp(ln(ed)*(n2-1)));
tbc:=Tb-273.15;
X1:=exp(n1*ln(ed));
X2:=exp((n1-1)*ln(ed));
Dx:=exp((n2-1)*ln(ed));
Pin:=Pa*X1/(ed-1)*(lm/(n2-1)*(1-1/Dx)-(1-1/X2)/(n1-1));
Ax:=0.04; Bx:=0.0135; Sx:=0.5;
Pis:=Pin;
Vh:=3.1415926*Dpor*Dpor*Sh*1000/4*m;
Ni:=Pis*Vh*nkv*(1-pci)/30/tau;
Nui:=Pis*alf*10*1000/(Hu*Sk*Nuv);
gi:=3600*1000/Hu/Nui;
Vp:=Sh*nkv/30;
Pm:=(ax+bx*Vp)*sx;
Pe:=Pis-Pm;
Num:=Pe/Pis;
Nue:=Nui*Num;
ge:=gi/Num;
Ne:=Pe*Vh*nkv*(1-pci)/30/tau;
Tkr:=30000*Ne/3.1415926/nkv;
Nel:=Ne/Vh;
Gt:=Ne*ge*0.001;

end;
end.

```

```

{подпрограмма расчёта электрических характеристик}
unit elekt;
interface
Procedure elektr(Dpor, Spor, Sh, Vpor:real;g,ii :integer;
var E,E1,z,hz,FFpp,I,N:real);
implementation
Procedure elektr;

const h=0.001;    Pi=3.1415926;    mu=12.566370614E-7;    Ic=450;

var Fv,Fv1,Fk,Fk1,zn,zz,y,yn,Bz,Bz1,Bz2,dfii,Sbz,fi,fii,kv,
    L,K,K1,Sn,Cs,FFp,dy,M,V,E22,Fp,a,NN,Rp
                                : real;

begin
Rp:=Dpor/2;    yn:=Rp+0.001;    a:=mu/(Pi*4);
{*****}
if ii=1 then begin
zz:=Sh/2+Sh/g;    y:=0;    dy:=0.001;    FFpp:=0;
while y<=yn do begin
fi:=0;    Sbz:=0;    dfii:=Pi/180*20;
while fi<=340 do begin
fii:=Pi/180*fi;    Sn:=Rp*Sin(fii);    Fk:=Rp-y*Sin(fii);
Fv:=zz*zz+y*y-2*y*Sn+Rp*Rp;
Bz:=a*Ic*Rp*dfii*Fk/(SQRT(Fv*Fv*Fv));
Sbz:=Sbz+Bz;    fi:=fi+20;
end;
FFp:=Pi*Sbz*(2*y+dy)*dy;    FFpp:=FFpp+FFp;    y:=y+dy;
end;
end;
Fp:=FFpp;
{*****}
L:=mu*yn*(ln(16*yn/h)-1.75);    V:=30; { z:=0.015; }
hz:=Sh/g;

y:=0;    dy:=0.001;    FFpp:=0;
while y<=yn do begin

fi:=0;    Sbz:=0;    dfii:=Pi/180*20;

while fi<=340 do begin
fii:=Pi/180*fi;
Sn:=Rp*Sin(fii);
Fk:=Rp-y*Sin(fii);
Fv:=z*z+y*y-2*y*Sn+Rp*Rp;
Bz:=a*Ic*Rp*dfii*Fk/(SQRT(Fv*Fv*Fv));
Sbz:=Sbz+Bz;
fi:=fi+20;
end;

FFp:=Pi*Sbz*(2*y+dy)*dy;
FFpp:=FFpp+FFp;
y:=y+dy;

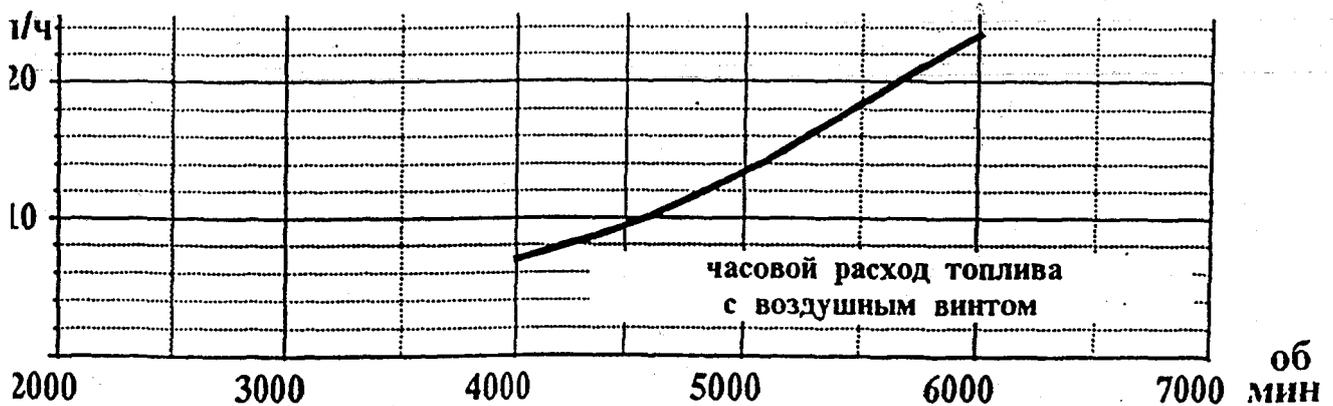
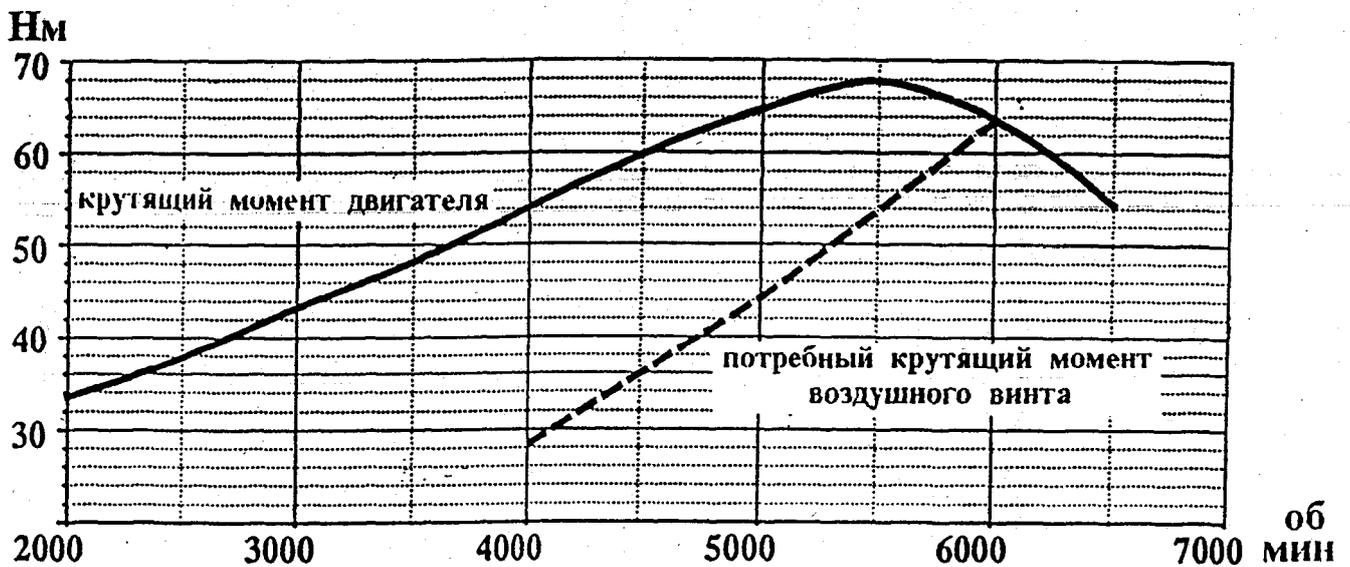
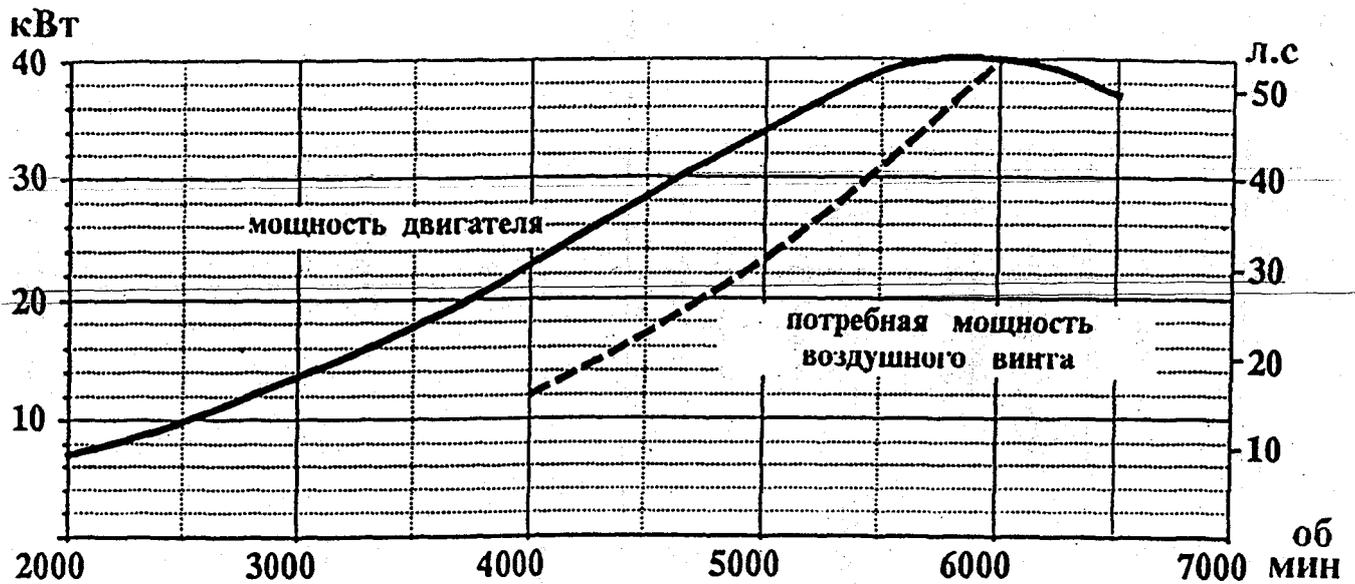
end;

E:=V*(FFpp-Fp)/hz;
if ii=1 then E1:=E else E1:=E+(E-E1);

I:=FFpp/L; if E>=0 then N:=I*E else N:=-I*E;    NN:=NN+N;
Fp:=FFpp;
NN:=NN/g;
end;
end.

```

ПРИЛОЖЕНИЕ 2



Характеристики двигателя "ROTAH-582UL DCDI" /40