

МОДУЛЬНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ СТИРЛИНГА

В.А. Четвертаков, к.т.н.; ООО «Промтехсервис»

Известно, что двигатель Стирлинга с типовой β -схемой обеспечивает наибольшую экономичность цикла. Однако, ромбический механизм, применяемый при реализации этой схемы, содержит большое количество избыточных связей и требует высокой точности изготовления. Это делает β -схему технологически не перспективной по сравнению с другими тепловыми схемами двигателя Стирлинга.

В работе представлено альтернативное кинематическое решение, не требующее высокой точности. Оно позволяет получить модуль, состоящий из двух β -машин, работающих на одно колено вала.

Набор таких модулей позволяет получить двигатель Стирлинга необходимой мощности при умеренных давлениях и температурах рабочего тела.

По мере сокращения запасов невозобновляемого углеводородного сырья и в связи с ужесточением экологических требований к двигателям малой энергетики в настоящее время наблюдается очередной пик интереса к двигателям Стирлинга, [1–5].

Настоящая работа посвящена решению одной частной конструкторской задачи в этой области — поиску технологичной кинематической β -схемы для двигателя Стирлинга.

Известно, что β -схема обеспечивает одну из наиболее рациональных компоновок тепловой части двигателя Стирлинга [6]. Конструктивно в большинстве случаев β -схема реализуется с использованием ромбического механизма. Основным недостатком такого механизма, как известно, является наличие в нем одновременно нескольких так называемых избыточных связей [2]. Это обстоятельство требует высокой точности изготовления звеньев, что делает ромбический механизм технологически неконкурентоспособным по сравнению с плоскими шарнирными многозвенниками.

На рис. 1 представлена кинематическая схема, альтернативная схеме ромбического плоского механизма, который также обеспечивает работу β -машины.

Одноколенный вал через шатунно-коромысловую систему связан с вытеснителями и рабочими поршнями двух машин, работающих в противо-

фазе. Расстояние между цилиндрами определяется только диаметрами элементов тепловой части и диаметрами фланцев сборки. Поэтому нагреватели обеих машин могут быть расположены практически вплотную друг к другу. Полости под рабочими поршнями обеих машин соединены между собой (рис. 2), в результате чего объем суммарной буферной полости и давление в ней постоянны. В случае изоляции буфера от картерной полости суммарный его объем определяется практически только площадью одного поршня, его ходом и емкостью соединительного канала. Такое сочетание β -схемы с малообъемным буфером сводит к минимуму массу части машины, находящейся под давлением рабочего тела.

Схема, представленная на рис. 1, имеет кинематическую особенность, которую приходится учитывать при проектировании: скорости прохождения мертвых точек поршнями левой и правой машин не одинаковы. Следовательно, и рабочие процессы в машинах несколько отличаются. Уменьшением относительной длины кривошипа это различие может быть ослаблено. Кроме того, целенаправленным изменением длин звеньев можно изменять соотношение времен прямого и обратного хода, а также фазовый сдвиг между мертвыми точками вытеснителя и рабочего поршня. Эти свойства механизма при необходимости могут быть использованы для сближения мощностей обеих машин.

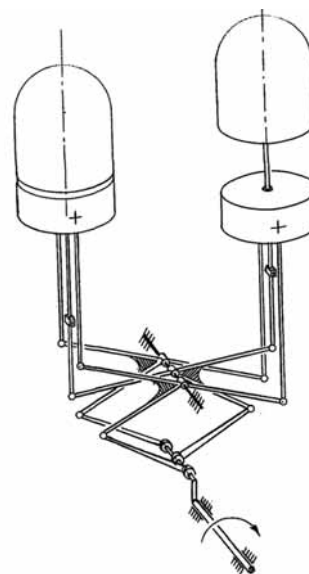


Рис. 1. Кинематическая β -схема двухцилиндрового двигателя Стирлинга

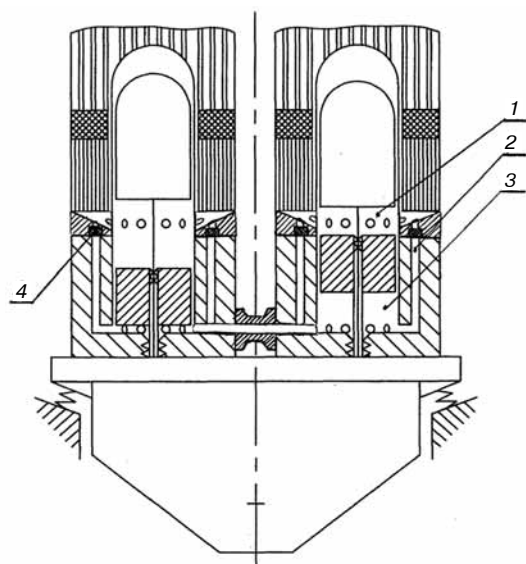


Рис. 2. Двухцилиндровый двигатель Стирлинга

Одним из отличительных свойств альтернативной кинематической схемы (см. рис. 1) является чрезвычайно малое нормальное усилие на стенки цилиндров. Так, в конструктивно проработанном двигателе мощностью 11,6 кВт при максимальной расчетной величине суммарной силы на рабочем поршне 6770 Н его нормальное усилие на стенку не превышает 110 Н (рис. 3). По аналогии с кривошипно-шатунным механизмом это соответствует максимальному наклону шатуна к оси цилиндра $0^{\circ}56'$. Поэтому здесь механические потери сводятся лишь к трению в цилиндрических парах и в уплотнениях. Это позволяет ожидать относительно высокого механического КПД. Машину малой мощности, работающей по альтернативной схеме, можно спроектировать с применением закрытых подшипников. Если при этом объединить еще и буфер с полостью картера, можно свести к минимуму потери в уплотнениях.

Машина большей мощности должна иметь жидкостную смазку механизма движения. В этом случае рабочие поршни снабжаются крейцкопфами и многокамерными штоковыми уплотнениями. Возврат протечек рабочего тела в зону высокого давления из нижних камер этих уплотнений (рис. 4) посредством микрокомпрессора 1 с автономным электроприводом исключает контакт чистого газа с маслом картера. При этом картер выполняется вентилируемым, тонкостенным. Пуск и остановка компрессора 1 осуществляются прессостатом 6, поддерживающим в заданных пределах давление в нижних камерах уплотнений. Кроме того, компрессор 1 в сочетании с управляющими дросселями 2 и 3 и баллонами низкого 4 и высокого 5 давлений позволяет изменять мощность двигателя на ходу. При необ-

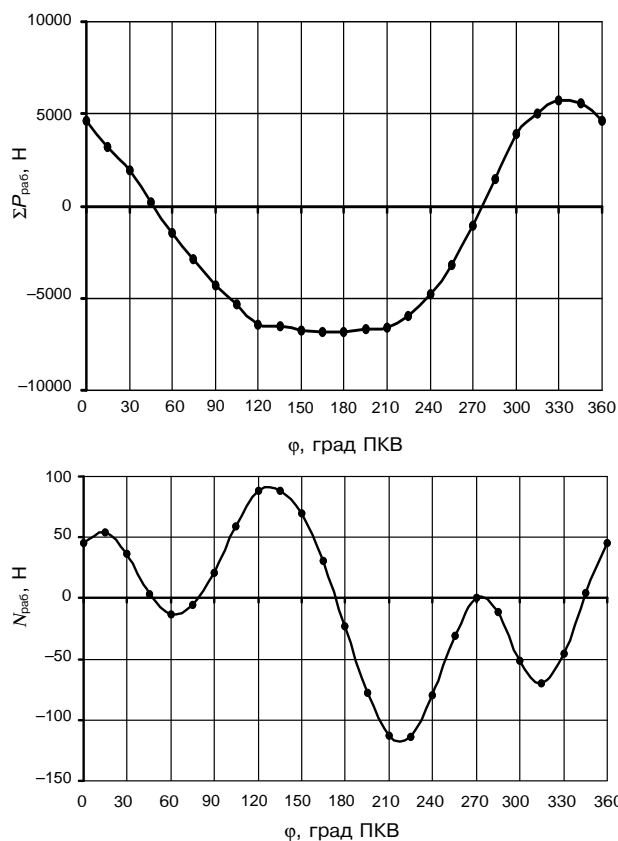


Рис. 3. Сравнение суммарной поршневой силы $\Sigma P_{\text{раб}}$, приближенной к рабочему поршню и нормальной реакции $N_{\text{раб}}$ со стороны стенки крейцкопфной направляющей

ходимости выведения на длительное время машины из эксплуатации компрессор перекачивает рабочее тело в баллон 5. Для защиты рабочего тела от аварийного попадания частиц масла в контуре компрессора может быть установлен адсорбционный фильтр 7.

При необходимости машина может быть снабжена устройством облегченного пуска. На рис. 2 схематично показана возможность такой разгрузки. При пуске рабочие полости 1 соединены

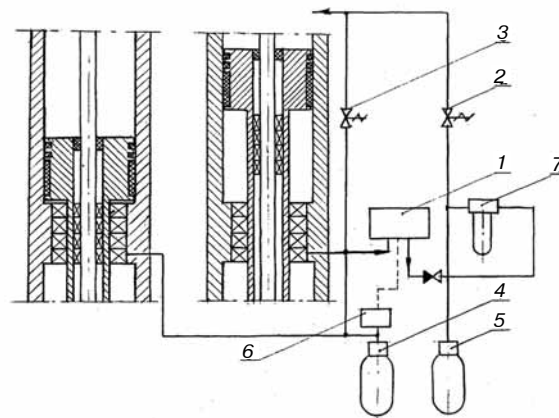


Рис. 4. Схема возврата протечек рабочего тела

каналами 2 с буфером 3, поэтому пусковой момент сопротивления на валу минимален. После достижения необходимой частоты вращения золотниковые кольца 4 поворачиваются, отсекая рабочие полости от буфера, и двигатель начинает работу. Поворот колец 4 осуществляется исполнительными гидроцилиндрами, куда подается масло под давлением системы смазки (на схеме не показаны). Перед остановкой масло сбрасывается в картер, а золотниковые кольца опять соединяют рабочие полости с буфером.

Условием уравнивания сил инерции в механизме является попарное равенство масс поршней и статический баланс каждого из коромысел относительно оси качания. Поэтому поступательная вибрация корпуса машины, обусловленная силами инерции, принципиально отсутствует. Это обстоятельство позволяет размещать машину вблизи жилых помещений, например, в подвале коттеджа.

Инерционное воздействие механизма на корпус, тем не менее, имеет место. Оно проявляется в виде опрокидывающего момента с преобладанием гармоники 1-го порядка. Подавление этой гармоники обеспечивается балансиром, установленным на оси коромысел и приводимым в возвратно-вращательное движение шатуном от отдельного колена (рис. 5). Балансирное колено закреплено на хвостовике рабочего колена клеммовым соединением. Угол заклинки балансирного колена и момент инерции балансира определяются массами поршней и геометрией масс остальных подвижных частей. При этом сохраняются преимущества осевой сборки одноколенной машины. На рис. 6 показаны диаграммы опрокидывающего момента двигателя мощностью 11,6 кВт без уравнивания и с балансирным уравниванием.

Необходимо заметить, что балансирное уравнивание явилось вынужденным средством для двухцилиндровой машины, которая подлежала исследованию и доводке в виде одноколенного

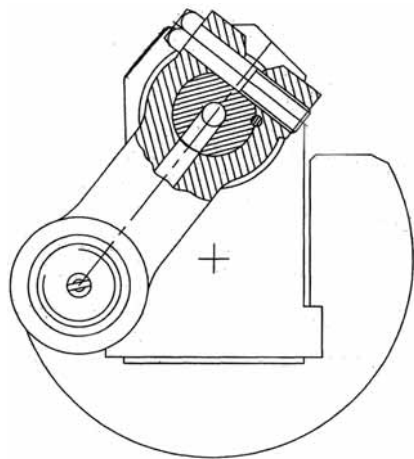


Рис. 5. Колено привода балансера

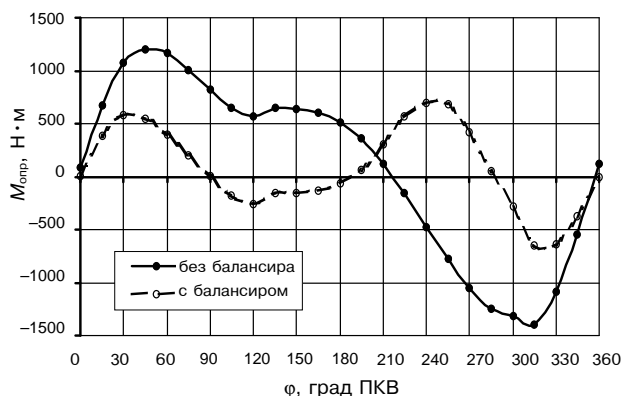


Рис. 6. Эффективность балансирного уравнивания первой гармоники опрокидывающего момента $M_{опр}$ двухцилиндрового двигателя Стирлинга

β -модуля. После доводки и соединения как минимум двух таких модулей на одном двухколенном валу необходимость в балансире просто отпадает. На рис. 7 приведено сравнение диаграмм опрокидывающего момента для двигателей с различным количеством двухцилиндровых модулей, приводящих один коленчатый вал. С ростом числа модулей наблюдается снижение амплитуды определяющей гармоники момента и рост ее частоты. Это обстоятельство позволяет существенно облегчить виброизоляцию агрегата либо в простейшем случае — уменьшить момент инерции фундамента под двигателем относительно продольной оси агрегата.

Хотя двухколенный и последующие варианты валов исключают удобства осевой сборки, максимально плотное расположение нагревателей такого многомодульного двигателя предполагает возможность использования одного источника тепла.

Таким образом, шатунно-коромысловый механизм позволяет получить простые в изготовлении и сборке уравновешенные β -машины Стирлинга.

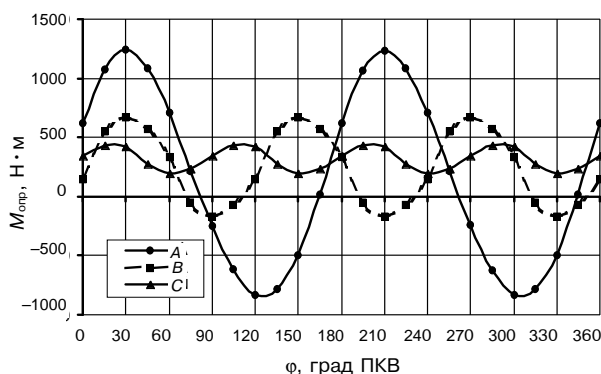


Рис. 7. Зависимость диаграммы опрокидывающего момента $M_{опр}$ двигателя от количества двухцилиндровых модулей на одном коленчатом валу:

A — два модуля, заклинка колен под 180°C , $P_e = 23,2$ кВт;
B — три модуля, заклинка колен под 120°C , $P_e = 34,8$ кВт;
C — четыре модуля, заклинка колен под 90°C , $P_e = 46,4$ кВт

Нужная мощность достигается при умеренных давлениях и температурах путем увеличения количества двухцилиндровых модулей, работающих на один вал.

В заключение, выходя за рамки β -схемы, отметим, что некоторое видоизменение механизма по рис. 1 позволяет получить также и одновальную

«квадратную четверку» Стирлинга двойного действия. Однако технологическая простота конструкции не компенсирует возникающих при этом сложностей уравнивания инерционных усилий механизма. Поэтому в настоящее время работа в этом направлении представляется нецелесообразной.

Литература

1. Столяров С.П. Двигатели Стирлинга. Проблемы XXI века. Инженерные проблемы маркетинга // Двигателестроение. — 2002. — № 1. — С. 9–12.
2. Столяров С.П. Двигатели Стирлинга. Проблемы XXI века. Кинематические механизмы // Двигателестроение. — 2002. — № 2. — С. 3–6.
3. Столяров С.П. Двигатели Стирлинга. Проблемы XXI века Системы подвода теплоты // Двигателестроение. — 2002. — № 3. — С. 15–18.

4. Кириллов Н.Г. Машины Стирлинга для высокоэффективных и экологически чистых систем энергоснабжения // Химическое и нефтегазовое машиностроение. — 2000. — № 12. — С. 21–24.
5. Бреусов В.П. Машина Стирлинга и двигатель Эриксона // Машины и механизмы. — 2006. — № 3. — С. 32–36.
6. Ридер Г.Т., Хупер Ч. Двигатели Стирлинга. — М.: Мир. — 1986.
7. Решетов Л.Н. Самоустанавливающиеся механизмы. — М.: Машиностроение. — 1991.

Назначен новый начальник Военного инженерно-технического университета



В соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 9 июля 2007 г. № 854, Приказом Министра обороны от 11 июля 2007 г. № 810 начальником Военного инженерно-технического университета (ВИТУ) назначен Заслуженный строитель Российской Федерации, Почетный работник жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации генерал-лейтенант Лудченко Николай Иванович.

В ВИТУ Н.И. Лудченко прибыл с должности заместителя командующего войсками Дальневосточного военного округа по расквартированию и обустройству войск.

За годы службы в вооруженных силах РФ генерал-лейтенант Лудченко Николай Иванович награжден Орденом Почета и 12 медалями.

Факультету энергетики ВИТУ — 65 лет

В 2007 г. факультет энергетики ВИТУ отметил свое 65-летие. За эти годы на факультете было подготовлено более десяти тысяч высококвалифицированных специалистов в области автоном-



ной энергетики на базе поршневых двигателей и газовых турбин.

Выпускники факультета сегодня трудятся на военных стройках и самых различных объектах военной энергетики, в том числе уникальных, не имеющих аналогов в стране и мире. Многие из них стали руководителями крупных строительно-монтажных организаций, заводов, специализированных отделов и организаций, командирами воинских частей. Квалифицированные специалисты и крупные ученые не только обеспечивают учебный процесс на факультете, но и принимают участие в научной работе, направленной на развитие и совершенствование военной науки и техники.

Среди почти ста выпускников этого года два золотых медалиста, четырнадцать человек получили дипломом с отличием. Выпускники-отличники были на приеме у Верховного главнокомандующего Президента РФ В.В. Путина в Москве.

По итогам сдачи экзамена по специальности и защиты выпускных квалификационных работ Государственная аттестационная комиссия высоко оценила уровень подготовки молодых лейтенантов — средний балл превысил оценку «хорошо».

В новом учебном году 114 человек — вчерашних выпускников школ, техникумов, суворовских и нахимовского училищ, кадетских корпусов — зачислены на первый курс факультета энергетики ВИТУ.

*Д.В. Антонович, к.т.н.
Начальник факультета энергетики*