

## АВТОЭКВИДИСТАНТАЛЬНОЕ РОТОРНО-ПОРШНЕВОЕ УСТРОЙСТВО

А.Ф. Равич, к.ф.-м.н., доц., С.Н. Богданов, д.т.н., проф.  
Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет

В статье представлены результаты анализа кинематики и динамики автоэквилистантного (АЭД) роторно-поршневого устройства (РПУ), аналогичного РПУ известного двигателя Ванкеля. Принципиальное отличие АЭДРПУ состоит в том, что герметизирующий контакт между радиальными рабочими поверхностями ротора и статора осуществляется плоскими радиальными пластинами уплотнения, устанавливаемыми в двух диаметрально противоположных областях на радиальной рабочей поверхности статора по нормали к гладкой, эквидистантной самой себе, радиальной рабочей поверхности ротора. Показано, что АЭДРПУ имеет следующие преимущества по сравнению с РПУ Ванкеля:

- исключены избыточные контактные давления и обеспечена достаточная надежность радиальных герметизирующих уплотнений;
- при одинаковых рабочих объемах и давлениях крутящий момент АЭДРПУ в полтора раза больше крутящего момента двигателя Ванкеля и в два раза больше крутящего момента обычного поршневого двигателя внутреннего сгорания.

Предлагается альтернатива известному [1] циклоидальному роторно-поршневому устройству двигателя Ванкеля. Стратегически важными для конкурентоспособности этого двигателя считаются проблемы неблагоприятной динамики и недостаточной надежности взаимодействия радиальных пластин уплотнения с радиальной рабочей поверхностью статора [1, 2], приводящие к необходимости применения специальных износостойких материалов и ограничению максимально возможного рабочего давления, и, как следствие, номинальной мощности двигателя. До настоящего времени данные проблемы не имеют удовлетворительного решения.

Предлагаемое [6] автоэквилистантное (далее АЭД) роторно-поршневое устройство (далее РПУ) представляет собой плоский механизм, включающий корпус-статор, поршень-ротор, механизм герметизирующего уплотнения между статором и ротором и механизм позиционирования ротора относительно статора.

На рис. 1 представлена принципиальная схема предлагаемого устройства.

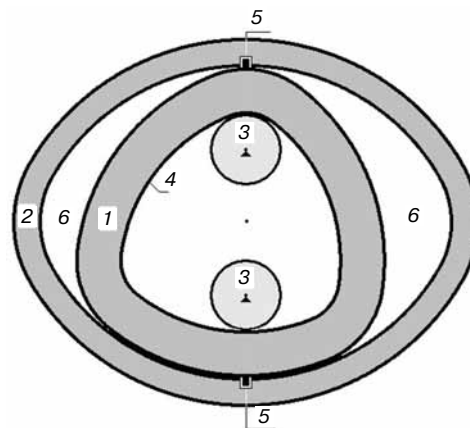


Рис. 1. Принципиальная схема автоэквилистантного РПУ

#### Функционирование устройства

Ротор 1, статор 2 и механизм герметизирующего уплотнения 5 обеспечивают кинематический синтез двух замкнутых рабочих полостей 6 с синхронно циклически непрерывно монотонно изменяемыми рабочими объемами при постоянном суммарном объеме, при этом:

- рабочие полости ограничены внутренней рабочей поверхностью статора и радиальной внешней рабочей поверхностью ротора;
- рабочая поверхность статора включает радиальную поверхность и две торцовые плоские поверхности, параллельные плоскости движения ротора;
- рабочие контуры ротора в любом сечении радиальной поверхности плоскостью движения являются автоэквилистантами, т. е. эквидистантными [3] самим себе плоскими кривыми;
- радиальная рабочая поверхность статора является кинематической огибающей рабочей поверхности ротора.

Механизм позиционирования 3, 4 ротора относительно статора включает несущий обод ротора с опорными дорожками и опорные катки, свободно вращающиеся на неподвижных осях; опорные дорожки 4 располагаются на внутренней поверхности обода, рабочие контуры опорных дорожек в любом сечении плоскостью движения эквидистантны вовнутрь рабочей контуры ротора в этой же плоскости; опорные катки 3 устанавливаются попарно в распор изнутри обода ротора касательно сопряженно опорным дорожкам;

неподвижные оси вращения катков располагаются в диаметральной плоскости, проходящей через центральную ось устройства перпендикулярно плоскости движения; позиционирование ротора относительно статора в процессе движения осуществляется путем обкатывания опорных катков опорными дорожками несущего обода; при этом радиусы окружностей рабочих контуров опорных катков должны быть меньше наименьшего радиуса кривизны сопряженного рабочего контура опорной дорожки.

Механизм герметизирующего уплотнения между рабочими поверхностями ротора и статора включает радиальные и торцовые пластины уплотнения, установленные в пазах на рабочих поверхностях ротора и статора; радиальные пластины уплотнения 5 располагаются на статоре перпендикулярно плоскости движения ротора вокруг диаметральной плоскости, проходящей через оси парных опорных катков; торцовые пластины уплотнения располагаются на торцовых плоскостях ротора эквидистантно периметрам радиальной рабочей поверхности ротора.

Способы геометрического синтеза рабочих контуров ротора АЭДРПУ ниже.

Преимущества предлагаемого устройства:

- исключение избыточных контактных давлений и обеспечение надежности радиальных пластин герметизирующего уплотнения между рабочими поверхностями статора и ротора;
- большой крутящий момент ротора.

Условия, при которых достигаются эти преимущества, определены ниже.

Отметим, что здесь не рассматриваются возможные и оптимальные варианты (которых много) механизмов уравнивания, отбора мощности и систем газообмена, необходимых для превращения данного устройства в двигатель. Предполагается, что это — тема для последующих публикаций.

**Автоэквидистанты. Правильные автоэквидистанты. Правильные автоэквидистанты с непрерывной кривизной.**

**Правильные полиокружности**

1. Автоэквидистанта — это плоская простая замкнутая регулярная выпуклая кривая, эквидистантная ([3], с. 53) самой себе.

2. Выбор формы автоэквидистанты в качестве рабочего контура предлагаемого устройства обусловлен определенными требованиями, предъявляемыми к кинематике и динамике ротора. Необходимый выбор обеспечивают правильные автоэквидистанты.

Синтез правильных автоэквидистант осуществляют путем эвольвентной развертки заданной эволюты с определенными ниже свойствами. Возможные варианты, представляющие практи-

ческий интерес, — правильные автоэквидистанты с непрерывной кривизной и правильные полиокружности.

3. Эволюта правильной автоэквидистанты с непрерывной кривизной имеет вид правильной звезды с нечетным числом вершин, в которой каждая вершина соединена с двумя смежными противоположными вершинами, при этом форма соединяющих дуг (ветвей) обусловлена тремя факторами:

- вогнутостью к геометрическому центру;
- соприкосанием в точке схождения (точка возврата эволюты);
- конгруэнтная инвариантность звезды при любой (в прямом и обратном порядке) последовательной перенумерации вершин.

Эвольвентную развертку производят, последовательно «обкатывая» ветви эволюты прямым отрезком с длиной  $D$ , большей длины ветви  $d$ ; при этом средняя точка отрезка в процессе «обкатки» должна пройти через срединную точку ветви.

На рис. 2, а показан первый шаг построения треугольной «гипоциклоидной» автоэквидистанты; исходная эволюта — гипоциклоида [3] с отношением производящих радиусов  $R/r = 3/1$ ;  $D = r + R = r + d + r$ ,  $r > 0$ ; 1, 2 — результат эвольвентной развертки ветви гипоциклоиды; на рис. 2, б показан конечный результат.

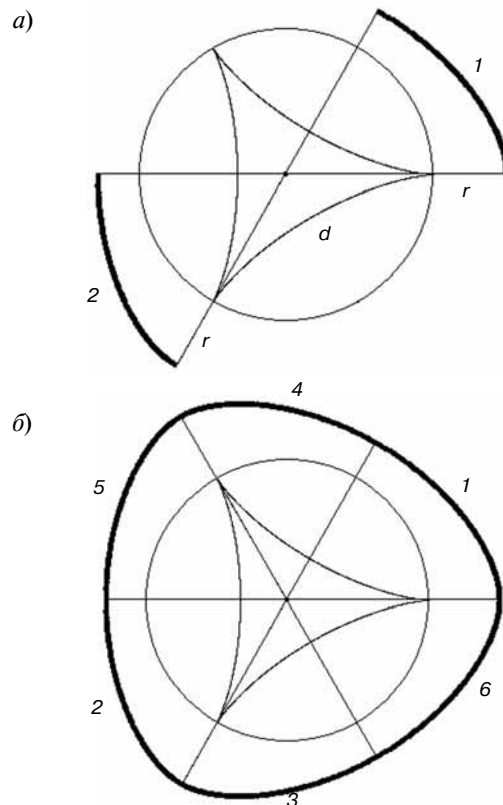


Рис. 2. Синтез треугольной «гипоциклоидной» автоэквидистанты

4. Правильная полиокружность является правильной автоэквидастантой с «вырожденной» эволютой, представленной совокупностью изолированных центров кривизны, расположенных в вершинах правильного многоугольника с нечетным числом сторон. Синтез правильной полиокружности аналогичен вышеописанному синтезу правильной автоэквидастанты с непрерывной функцией кривизны. Результирующая полиокружность представляет собой последовательность четного числа сопряженных дуг окружностей с производящими радиусами  $r$  (малый радиус) и  $R$  (большой радиус); причем, в этой последовательности радиусы сопряженных составляющих чередуются ( $r, R, r, R, \dots$ ).

Рис. 3, иллюстрируют способ синтеза правильной треугольной полиокружности, обозначения аналогичны обозначениям на рис. 2.

На рис. 4 представлены результаты синтеза пятиугольных автоэквидастант: гипоциклоидной автоэквидастанты (рис. 4, а) и полиокружности (рис. 4, б).

#### Анализ кинематики и динамики автоэквидастантального роторно-поршневого устройства

Приведем основные расчетные характеристики устройства: функции мгновенного центра вращения ротора, рабочего объема, крутящего момента; число рабочих тактов за один оборот ротора.

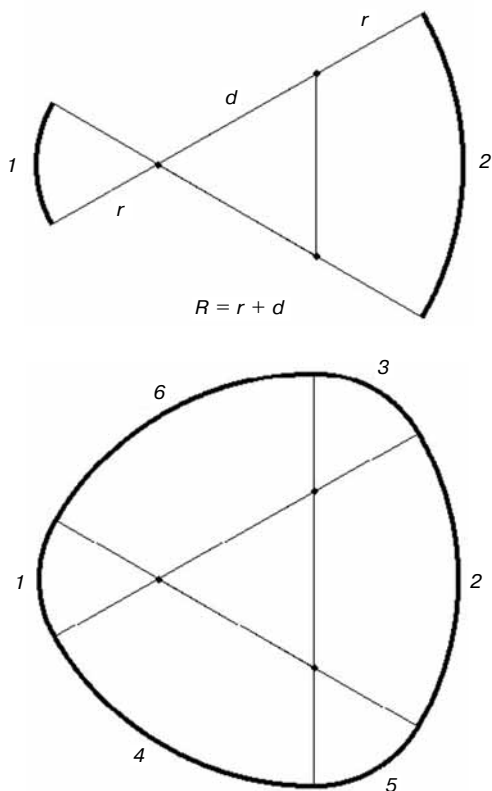


Рис. 3. Синтез треугольной полиокружности

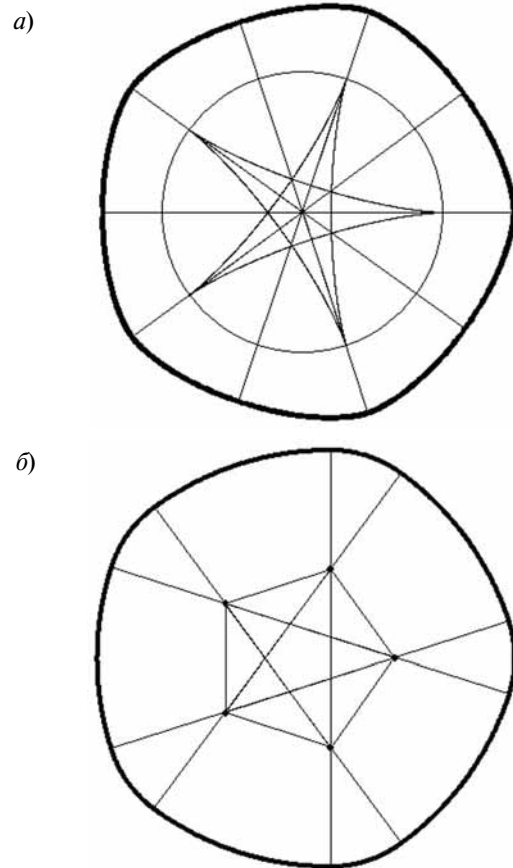


Рис. 4. Синтез пятиугольных автоэквидастант

Данные характеристики рассчитаны для устройств с цилиндрической радиальной рабочей поверхностью ротора и с рабочими контурами — правильными полиокружностями. Кинематико-динамическая схема устройства с деталями расчета показана на рис. 5.

#### 1. Поведение мгновенного центра вращения

На схеме (рис. 5) видно, что мгновенный центр вращения  $O$ , совпадающий в данный момент с одним из центров кривизны правильной полиокружности, неподвижен в течение такта изменения рабочего объема и находится на диаметральной линии  $A_0B_0$ , соединяющей точки контакта ротора с радиальными пластинами уплотнения, на расстоянии производящего радиуса  $r$  от одной из этих точек контакта (в данном случае от точки  $A_0$ ). Полный такт осуществляется при изменении угла поворота  $\alpha$  ротора от  $0$  до  $\pi/k$  (здесь и далее  $k$  — число «углов» полиокружности). При этом объемы двух рабочих полостей изменяются непрерывно монотонно и синхронно в противофазе: один — возрастая от  $V_{\min}$  до  $V_{\max}$ , другой — убывая от  $V_{\max}$  до  $V_{\min}$ , где  $V_{\min}$  и  $V_{\max}$  — минимальный и максимальный рабочие объемы. В следующем такте характер изменения рабочих объемов меняется на противоположный.

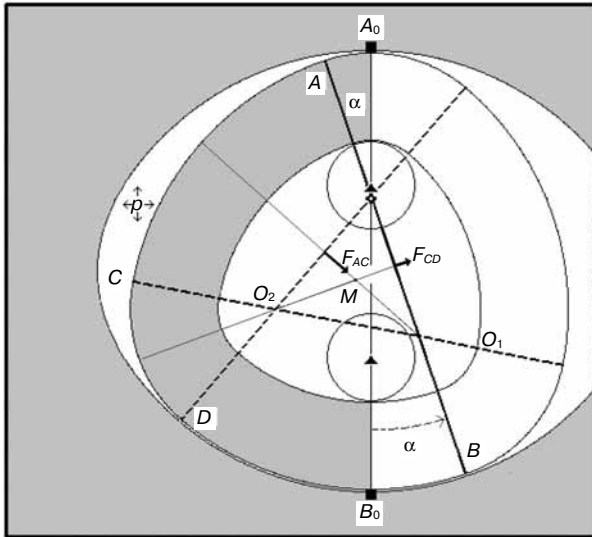


Рис. 5. Анализ кинематики и динамики автоэквилибрального РПУ

В момент завершения такта мгновенный центр вращения ротора «скачком» перемещается в противоположную позицию (в данном случае на диаметральной линии  $A_0B_0$ , на расстоянии  $r$  от точки  $B_0$ ).

Такое скачкообразное изменение положения мгновенной оси вращения ротора характерно для предлагаемых устройств, в которых рабочие контуры ротора являются правильными полиокружностями; в устройствах с непрерывной кривизной рабочих контуров ротора мгновенная ось вращения ротора перемещается непрерывно между двумя противоположными позициями на диаметральной линии, соединяющей точки контакта ротора с радиальными пластинами уплотнения.

## 2. Рабочие объемы

Из схемы на рис. 5 видно, что приращение площади рабочего контура рабочей полости между точками контакта ротора с радиальными пластинами уплотнения при повороте ротора на угол  $\alpha$  равно разности площадей секторов  $B_0OB$  и  $A_0OA$ . Отсюда следует:

$$a) V_+ = H \cdot (R^2 - r^2) \cdot \alpha/2, \quad V_- = H \cdot (R^2 - r^2) \times (\pi/k - \alpha) / 2,$$

где  $V_+$  и  $V_-$  — возрастающая и убывающая функции рабочего объема при изменении  $\alpha$  от 0 до  $\pi/k$ ;  $H$  — ширина рабочего пространства (между замыкающими торцовыми плоскостями); таким образом, рабочие объемы изменяются пропорционально углу поворота ротора;

$$б) V_{\max} = V_{\min} + H \cdot (R^2 - r^2) \cdot \pi/(2 \cdot k).$$

3. Число тактов за полный оборот ротора определяется угловой длиной  $\pi/k$  одного такта и числом 2 рабочих полостей:  $j = 4 \cdot k$ :

$k = 3j = 12$ , так же как в двигателе Ванкеля с треугольным ротором.

## 4. Крутящий момент

Из схемы на рис. 5 видно, что величина крутящего момента  $M$  ротора относительно центра вращения  $O$  равна сумме двух величин крутящих моментов  $M_{AC}$  и  $M_{CD}$ , создаваемых силами  $F_{AC}$  и  $F_{CD}$ . Обозначенные силы есть результат действия давления  $p$  рабочего тела на соответствующие участки рабочей цилиндрической поверхности ротора, ограниченные образующими в точках  $A, C, D$ .

Линия действия силы  $F_{AC}$  проходит по биссектрисе угла  $AO_1C$ ,  $|F_{AC}| = p \cdot H \cdot |AC| = p \cdot H \cdot R \cdot \pi/3$ , «плечо»  $F_{AC}$  относительно  $O$  равно  $OO_2/2 = (R - r) / 2 \rightarrow M_{AC} = p \cdot H \cdot (R - r) \cdot R \times \pi/6$ . Линия действия силы  $F_{CD}$  проходит по биссектрисе угла  $CO_2D$ ,  $|F_{CD}| = p \cdot H \cdot |CD| = p \cdot H \cdot r \cdot \pi/3$ , «плечо»  $F_{CD}$  относительно  $O$  равно  $OO_1/2 = (R - r) / 2 \rightarrow M_{CD} = p \cdot H \times (R - r) \cdot r \cdot \pi/6$ .

Для полноты картины следует отметить, что  $M_{AA_0} = M_{BB_0} = 0$ , так как линии действия соответствующих результирующих сил  $F_{AA_0}$  и  $F_{BB_0}$  проходят через центр вращения  $O$ .

Из предыдущего следует:  $M = M_{AC} + M_{CD} = p \cdot H \cdot (R^2 - r^2) \cdot \pi/6 = p \cdot (V_{\max} - V_{\min})$ .

Полученный результат действителен для всех  $k = 3, 5, 7 \dots$

## Сравнение крутящих моментов АЭДРПУ и прототипов

Далее представлены результаты сравнительного анализа величины крутящего момента (к. м.) исследуемого устройства, обычного поршневого двигателя внутреннего сгорания (ПДВС) с кривошипно-шатунным механизмом (КШМ) отбора мощности и двигателя Ванкеля. При этом предполагается идентичность исходных условий генерации рабочего тела и, в частности, рабочих объемов  $V = V_{\max} - V_{\min}$  и динамики давлений  $p$ .

1. Для ПДВС  $V = \pi \cdot R_{\text{п}}^2 \cdot S$ , к. м.  $M_{\text{п}} = p \cdot \pi \times R_{\text{п}}^2 r_{\text{к}} \sin(\alpha + \beta) / \cos\beta$  [4, 5],

где  $R_{\text{п}}$  — рабочий радиус поршня;  $r_{\text{к}}$  — радиус кривошипа КШМ;  $S$  — ход поршня;  $p$  — рабочее давление;  $\alpha$  и  $\beta$  — углы между линией хода поршня и кривошипом, шатуном.

Из выражений  $V$  и  $S = 2 \cdot r_{\text{к}}$  следует  $M_{\text{п}} = p \cdot V \cdot (1/2) \cdot \sin(\alpha + \beta) / \cos\beta$ .

Найдем  $\max M_{\text{п}} = p \cdot V \cdot (1/2) \cdot \max \sigma$ ,

где  $\sigma = \sin(\alpha + \beta) / \cos\beta$ ;  $\max \sigma$  достигается, когда  $\alpha + \beta = \pi/2$ ,  $\sin(\alpha + \beta) = 1$ ,

$$\cos\beta = \sin\alpha = L_{\text{ш}} / \sqrt{(L_{\text{ш}}^2 + r_{\text{к}}^2)},$$

откуда следует

$$\max \sigma = \sqrt{(L_{\text{ш}}^2 + r_{\text{к}}^2)} / L_{\text{ш}} = \sqrt{(1 + (r_{\text{к}}/L_{\text{ш}})^2)}$$

и

$$\max M_{\text{п}} = p \cdot V \cdot (1/2) \cdot \sqrt{(1 + (r_{\text{к}}/L_{\text{ш}})^2)} = p \cdot V \cdot (1/2) \cdot \sqrt{(1 + (1 + \lambda^2))},$$

где  $\lambda = r_{\text{к}}/L_{\text{ш}}$ ;  $L_{\text{ш}}$  — длина шатуна.

В современных ПДВС величина  $\lambda$  варьируется в пределах 0,23–0,30 [4, 5] соответственно,  $\max M_{\Pi} \approx p \cdot V \cdot 0,51454 \approx p \cdot V \cdot 0,52$ .

Из вышеизложенного следует  $M/M_{\Pi} > 1,923 \approx 1,9434$ .

Таким образом, крутящий момент АЭДРПУ почти в два раза превосходит крутящий момент обычного ПДВС.

2. Для двигателя Ванкеля с треугольным ротором [1, 2]:

$$V = \sqrt{3} \cdot a \cdot R \cdot H = \sqrt{3} \cdot c \cdot R^2 \cdot H, \text{ к. м.}$$

$$M_B = p \cdot \sqrt{3} \cdot a \cdot H \cdot r \cdot |\sin 2\varphi| = p \cdot \sqrt{3} \cdot c \cdot R \times H r \cdot |\sin 2\varphi| = p \cdot \sqrt{3} \cdot V \cdot (r/R) \cdot |\sin 2\varphi|,$$

где  $R, r$  — радиусы, соответственно, обкатывающей, обкатываемой окружностей в процедуре синтеза Эпитрохоиды Рабочего Контура Статора (ЭРКС);  $c$  — коэффициент удлинения ЭРКС;  $a = c \cdot R$  — производящий радиус ЭРКС;  $H$  — ширина (по образующей цилиндра) ротора;  $\varphi$  — угол между линией действия результирующей движущей силы давления рабочего тела и кривошипом эксцентрикового вала.

При этом так как  $r/R = 2/3$ , то  $M_B = p \cdot V \cdot (2/3) \cdot |\sin 2\varphi|$ , откуда следует  $\max M_B = p \cdot V \cdot (2/3)$  и  $M/M_B = 1,5$ .

Таким образом, крутящий момент АЭДРПУ в полтора раза превосходит крутящий момент двигателя Ванкеля.

#### **Выводы**

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы, имея ввиду обо-

значенные во введении проблемы двигателя Ванкеля.

1. Для АЭДРПУ проблемы избыточного контактного давления радиальных пластин уплотнения на радиальную рабочую поверхность статора не существует.

2. Конструкция АЭДРПУ допускает возможность использования многорядных радиальных пластин уплотнения, что существенно повышает надежность герметизации рабочих полостей.

3. Крутящий момент АЭДРПУ существенно больше крутящего момента традиционного поршневого двигателя внутреннего сгорания и двигателя Ванкеля при одинаковых исходных условиях генерации и динамики давлений рабочего тела.

---

#### **Литература**

1. *Алексеев В.П., Воронин В.Ф.* и др. Двигатели внутреннего сгорания. Устройство и работа поршневых и комбинированных двигателей. — М.: Машиностроение. 1990. — С. 253–260.
2. *Бениович В.С., Гостев В.Б.* К расчету кинематики и рабочих объемов роторнопоршневого двигателя // Тракторы и сельхозмашины. — 1961. — № 11.
3. *Шикин Е.В., Франк-Каменецкий М.М.* Кривые на плоскости и в пространстве. — М.: ФАЗИС, 1997.
4. *Шатров М.Г., Алексеев И.В., Богданов С.Н.* и др. Автомобильные двигатели: Курсовое проектирование. — М.: Издательский центр «Академия», 2011.
5. *Колчин А.И., Демидов В.П.* Расчет автомобильных и тракторных двигателей. — М.: Высшая школа, 2008.
6. *Равич А.Ф.* Автоэквилибрантное роторно-поршневое устройство. Патент RU 75 219 U1.