

# АВТОЭКВИДИСТАНТАЛЬНОЕ РОТОРНО-ПОРШНЕВОЕ УСТРОЙСТВО К ВОЗМОЖНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ

**Александр Фроимович Равич**, к. ф.-м. н.,  
**Сергей Николаевич Богданов**, профессор, д. т. н., Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, (МАДИ)

*Предложена альтернатива известному роторно-поршневому двигателю Ванкеля. Приведены результаты анализа кинематики и динамики предлагаемого устройства.*

*Proposed alternative to the known rotary-piston engine of the Wankel. The results of the analysis of the kinematics and dynamics of the proposed device.*

**Ключевые слова:** роторно-поршневое устройство, эквидистанта, автоэквидистанта, кинематика, динамика.  
**Keywords:** rotary-piston device, equidistant, autoequidistant, kinematics, dynamics

Предлагается альтернатива известному [1, стр. 253-259] циклоидальному роторно-поршневому устройству двигателя Ванкеля. Стратегически важными для конкурентоспособности этого двигателя считаются проблемы неблагоприятной динамики и недостаточной надёжности 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] автоэквидистантальное (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.

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 контуру ротора в этой же плоскости. Опорные катки (3) устанавливаются попарно в распор изнутри обода ротора касательно сопряжённо 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 путём обкатывания опорных катков опорными дорожками несущего обода, при этом радиусы окружностей рабочих контуров опорных катков должны быть меньше наименьшего радиуса кривизны сопряжённого рабочего контура опорной дорожки.

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

Способы геометрического синтеза рабочих контуров ротора предлагаемого автоэквидистантального роторно-поршневого устройства (далее АЭДРПУ) приведены ниже в разделе АВТОЭКВИДИСТАНТЫ. Автоэквидистанта - это плоская простая замкнутая регулярная выпуклая кривая, эквидистантная ([3], стр. 53) самой себе.

Преимущества предлагаемого устройства:

- 1) исключение избыточных контактных давлений и обеспечение надёжности радиальных пластин герметизирующего уплотнения между рабочими поверхностями статора и ротора;
- 2) 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 отдельной статьи.

Циклограмма с  $k=3$

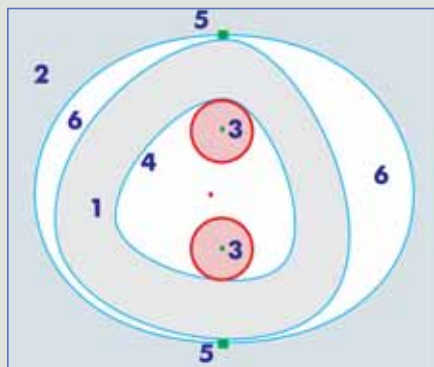


Рис.1. Принципиальная схема автоэквидистантального РПУ.

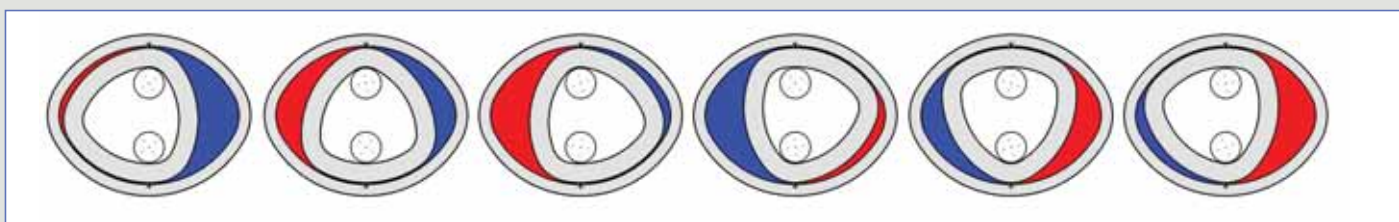
### ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВА

Ротор (1), статор (2) и механизм герметизирующего уплотнения (5) обеспечивают кинематический синтез двух замкнутых рабочих полостей (6) с синхронно циклически непрерывно монотонно изменяемыми рабочими объёмами при постоянном суммарном объёме, 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 автоэквидистантами, 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



**АВТОЭКВИДИСТАНТЫ.  
ПРАВИЛЬНЫЕ АВТОЭКВИДИСТАНТЫ.  
ПРАВИЛЬНЫЕ АВТОЭКВИДИСТАНТЫ С НЕПРЕРЫВНОЙ  
КРИВИЗНОЙ.  
ПРАВИЛЬНЫЕ ПОЛИОКРУЖНОСТИ**

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

Синтез правильных автоэквилистант осуществляют путём эвольвентной развёртки заданной эволюты с определёнными ниже свойствами. Возможные варианты, представляющие практический интерес, - правильные автоэквилистанты с непрерывной кривизной и правильные полиокружности.

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

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

Эвольвентную развёртку 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 показан первый шаг построения треугольной "гипоциклоидной" автоэквилистанты; исходная эволюта - гипоциклоида ([3], стр. 81-83) с отношением производящих радиусов  $R/r = 3/1$ ;  $D = r + R = r + d + r$ ,  $r > 0$ ; 1, 2 - результат эвольвентной развёртки ветви гипоциклоиды; на рис. 3 показан конечный результат.

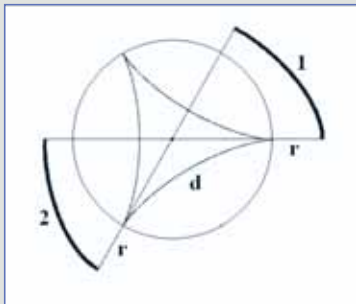


Рис. 2.

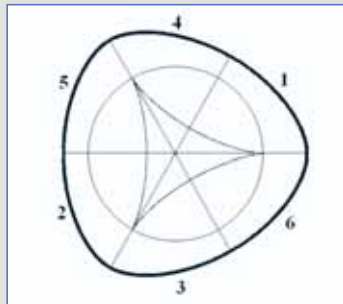


Рис. 3.

Синтез треугольной "гипоциклоидной" автоэквилистанты.

4) Правильная полиокружность является правильной автоэквилистантой с "вырожденной" эволютой, представленной совокупностью изолированных центров кривизны, расположенных в вершинах правильного многоугольника с нечётным числом сторон. Синтез правильной полиокружности аналогичен вышеописанному синтезу правильной автоэквилистанты с непрерывной функцией кривизны. Результирующая полиокружность представляет собой последовательность чётного числа сопряжённых дуг окружностей с производящими радиусами  $r$  (малый радиус) и  $R$  (большой радиус); причём, в этой последовательности радиусы сопряжённых составляющих чередуются ( $r, R, r, R, \dots$ ).

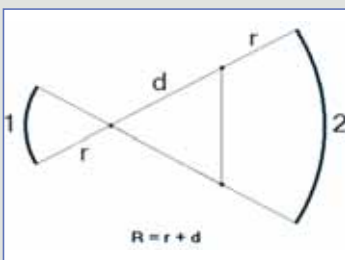


Рис. 4.

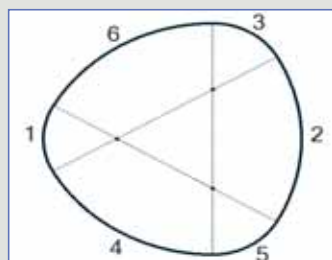


Рис. 5.

Синтез треугольной полиокружности (обозначения аналогичны обозначениям на рис.2, 3).



Рис. 6.

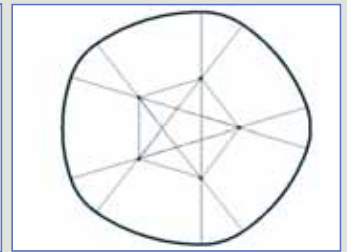


Рис. 7.

Синтез пятиугольных автоэквилистант гипоциклоидной автоэквилистанты (рис. 6) и полиокружности (рис. 7).

**АНАЛИЗ КИНЕМАТИКИ И ДИНАМИКИ АВТОЭКВИДИСТАНТАЛЬНОГО РОТОРНО-ПОРШНЕВОГО УСТРОЙСТВА.**

Ниже приведены основные расчётные характеристики устройства:

- функция мгновенного центра вращения ротора,
- функция рабочего объёма,
- число рабочих тактов за один оборот ротора,
- функция крутящего момента.

Данные характеристики рассчитаны для устройств с цилиндрической радиальной рабочей поверхностью ротора и с рабочими контурами - правильными полиокружностями.

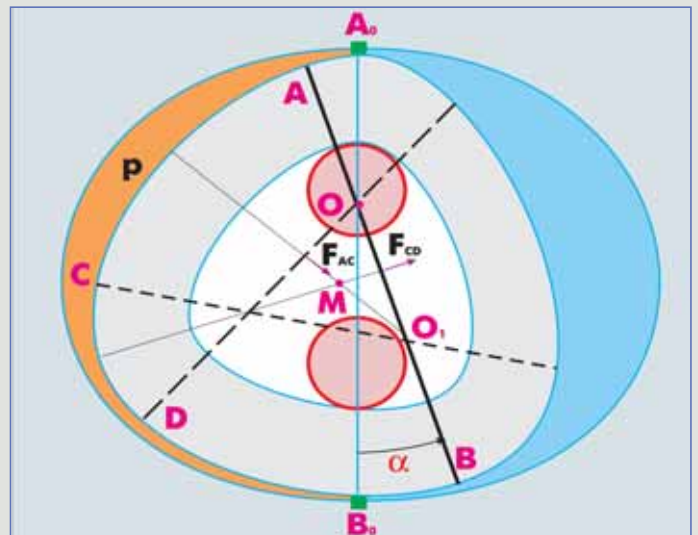


Рис. 8. Анализ кинематики и динамики автоэквилистантного РПУ с деталями расчёта.

1) Поведение мгновенного центра вращения.

На схеме (рис. 8) видно, что мгновенный центр вращения  $O$ , совпадающий в данный момент с одним из центров кривизны правильной полиокружности, неподвижен в течение такта изменения рабочего объёма 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 ротора от  $0$  до  $\pi/k$  (здесь и далее  $k$  - число "углов" полиокружности). При этом, объёмы двух рабочих полостей непрерывно монотонно изменяются синхронно в противофазе: один - возрастая от  $V_{min}$  до  $V_{max}$ , другой - убывая от  $V_{max}$  до  $V_{min}$ , где  $V_{min}$ ,  $V_{max}$  - соответственно, минимальный, максимальный рабочие объёмы. В следующем такте характер изменения рабочих объёмов меняется на противоположный.

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.



Циклограмма с  $k=5$

2) Рабочие объёмы.

Из схемы на рис. 8 видно, что приращение площади рабочей контура рабочей полости между точками контакта ротора с радиальными пластинами уплотнения при повороте ротора на угол равно разности площадей секторов  $B_0OB$  и  $A_0OA$ . Отсюда следует:

$$V_+ = H \cdot (R^2 - r^2) \cdot \alpha / 2, \quad V_- = H \cdot (R^2 - r^2) \cdot (\pi/k - \alpha) / 2, \text{ где}$$

$V_+, V_-$  - соответственно, возрастающая, убывающая функции рабочего объёма при изменении  $\alpha$  от 0 до  $\pi/k$ ,

$H$  - ширина рабочего пространства (между замыкающими торцовыми плоскостями);

Таким образом, рабочие объёмы изменяются пропорционально углу поворота ротора;

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

3) Число тактов за полный оборот ротора,

определяется угловой длиной  $\pi/k$  одного такта и числом 2 рабочих полостей:  $j = 4 \cdot k$

Для  $k=3, j=12$ , также как в двигателе Ванкеля с треугольным ротором.

4) Крутящий момент.

Из схемы на рис. 8 очевидно, что величина  $M$  крутящего момента ротора относительно центра вращения  $O$  равна сумме двух величин  $M_{AC}$  и  $M_{CD}$  крутящих моментов, порождаемых силами, соответственно  $F_{AC}$  и  $F_{CD}$ . Обозначенные силы resultируют действие 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

$$OO_2 / 2 = (R - r) / 2 \Rightarrow MAC = p \cdot H \cdot (R - r) \cdot R \cdot \pi / 6.$$

Аналогично, линия действия силы  $F_{CD}$  проходит по биссектрисе угла  $CO_2D$ ,

$$|F_{CD}| = p \cdot H \cdot |CD| = p \cdot H \cdot r \cdot \pi / 3, \text{ "плечо" } F_{CD} \text{ относительно}$$

$O$  равно:

$$OO_1 / 2 = (R - r) / 2 \Rightarrow M_{CD} = p \cdot H \cdot (R - r) \cdot r \cdot \pi / 6.$$

Для полноты картины следует отметить, что  $M_{AA_0} = M_{DB_0} = 0$ , т.к. линии действия соответствующих resultирующих сил  $F_{AA_0}$  и  $F_{DB_0}$  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 объёмов  $V = V_{\max} - V_{\min}$  и динамики давлений  $p$ .

1) Для ПДВС  $V = \pi \cdot R^2 \cdot S$ , к.м.  $M_{\Pi} = p \cdot \pi \cdot R^2 \cdot r_k \cdot \sin(\alpha + \beta) / \cos \beta$  [4, 5] где

$R_{\Pi}$  - рабочий радиус поршня,  $r_k$  - радиус кривошипа КШМ,  $S$  - ход поршня,

$p$  - рабочее давление,

$\alpha, \beta$  - углы между линией хода поршня и, соответственно, кривошипом, шатуном.

Из выражений  $V$  и  $S = 2 \cdot r_k$  следует  $M_{\Pi} = p \cdot V \cdot (1/2) \cdot \sin(\alpha + \beta) / \cos \beta$

Найдём  $\max M_{\Pi} = p \cdot V \cdot (1/2) \cdot \max \sigma$ , где  $\sigma = \sin(\alpha + \beta) / \cos \beta$ .

$\max \sigma$  достигается, когда  $\alpha + \beta = \pi/2$ ; тогда  $(L_{\text{ш}} - \text{длина шатуна})$

$$\sin(\alpha + \beta) = 1, \quad \cos \beta = \sin(\alpha - L_{\text{ш}} / \sqrt{L_{\text{ш}}^2 + r_k^2}), \text{ откуда следует}$$

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

$$\max M_{\Pi} = p \cdot V \cdot (1/2) \cdot \sqrt{1 + (r_k / L_{\text{ш}})^2} = p \cdot V \cdot (1/2) \cdot \sqrt{1 + (1 + \lambda^2)}, \text{ где}$$

$$\lambda = r_k / L_{\text{ш}}.$$

В современных ПДВС величина  $\lambda$  варьируется в пределах 0.23...0.3 [4, 5],

$$\text{соответственно, } \max M_{\Pi} \cong p \cdot V \cdot 0.51454 \dots p \cdot V \cdot 0.52.$$

Из вышеизложенного следует  $M / M_{\Pi} > 1.923 \dots 1.9434$ .

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

2) Для двигателя Ванкеля с треугольным ротором [1, 2]

$$V = \sqrt{3} \cdot a \cdot R \cdot H = \sqrt{3} \cdot c \cdot R \cdot H,$$

$$\text{к.м. } M_B = p \cdot \sqrt{3} \cdot a \cdot H \cdot r |\sin 2\phi| = p \cdot \sqrt{3} \cdot c \cdot R \cdot H \cdot r |\sin 2\phi| =$$

$$= p \cdot \sqrt{3} \cdot V \cdot (r/R) \cdot |\sin 2\phi|, \text{ где}$$

$R, r$  - 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,

$\phi$  - угол между линией действия resultирующей движущей силы давления рабочего тела и кривошипом эксцентрикового вала.

$$\text{При этом, т.к. } r/R = 2/3, \text{ то } M_B = p \cdot V \cdot (2/3) \cdot |\sin 2\phi|,$$

откуда следует:

$$\max M_B = p \cdot V \cdot (2/3) \text{ и } M / M_B = 1.5.$$

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

**ВЫВОДЫ**

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы, имея ввиду обозначенные 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 надёжность 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. В.П.Алексеев, В.Ф. Воронин и др. Двигатели внутреннего сгорания. Устройство и работа поршневых и комбинированных двигателей. М.: Машиностроение. 1990., стр. 253-260.

2. Бениович В.С., Гостев В.Б., К расчёту кинематики и рабочих объёмов роторпоршневого двигателя. "Тракторы и сельхозмашины". 1961. №11.

3. Шикин Е.В., Франк-Каменецкий М.М., Кривые на плоскости и в пространстве, М., ФАЗИС, 1997.

4. М.Г.Шатров, И.В.Алексеев, С.Н.Богданов и др. Автомобильные двигатели: Курсовое проектирование. М.: Издательский центр "Академия", 2011.

5. А.И.Колчин, В.П.Демидов. Расчёт автомобильных и тракторных двигателей. М.: Высшая школа. 2008.

6. А.Ф.Равич. Автоэксцентрикаторное роторно-поршневое устройство. Патент RU 75 219 U1.

Связь с автором: [ravichaf@mail.ru](mailto:ravichaf@mail.ru)