

УДК 621.43.011

КИНЕМАТИКА КРИВОШИПНО-КУЛИСНОГО ПАРАЛЛЕЛОГРАММНОГО ПРЕОБРАЗУЮЩЕГО МЕХАНИЗМА ЛОПАСТНОГО ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

В. В. КЛЕМЕНТЬЕВ¹

¹ klementev-vadim@yandex.ru

¹ ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ), г. Челябинск

Поступила в редакцию 27.12.2022

Аннотация. В статье представлено определение кинематических параметров (кинематики) двигателя внутреннего сгорания новой конструктивной схемы (нового типа) – лопастного ДВС (ЛДВС) с кривошипно-кулисным параллелограммным преобразующим механизмом (ККППМ). Рассматривается кинематика звеньев ККППМ – кривошипа (кривошипов), сердечника и лопасти, кулисы, ползуна. Приведены зависимости, полученные в ходе кинематического моделирования ЛДВС с ККППМ. Показаны графики, отражающие характер изменения кинематических параметров такого двигателя. Производится определение некоторых параметров, характеризующих особенности кинематической схемы ЛДВС с ККППМ.

Ключевые слова: лопастной двигатель внутреннего сгорания, кривошипно-кулисный преобразующий механизм, кинематика, кинематический параметр.

ВВЕДЕНИЕ

Кинематика является частью и основой одного из важнейших теоретических разделов науки, посвященной изучению физико-механических процессов, происходящих в двигателях внутреннего сгорания – динамики двигателей.

Кинематическим исследованиям ДВС разных типов и конструктивных схем посвящены многочисленные теоретические, в том числе фундаментальные, труды (в частности, такие как, например, [1–6]). Однако, практически все известные на сегодняшний день в этой области работы касаются двигателей внутреннего сгорания, в той или иной мере нашедших (или находивших в свое время) применение в технике и прошедших проверку (с более или менее положительными результатами) практикой использования: кривошипно-шатунных, роторных, свободнопоршневых.

На кафедре двигателей внутреннего сгорания и электронных систем автомобилей Южно-Уральского государственного университета (НИУ) предложен ряд технических решений по новой схеме двигателя внутреннего сгорания – лопастному ДВС с кривошипно-кулисным параллелограммным преобразующим механизмом. Основные из этих решений защищены патентами Российской Федерации ([7–9]).

Поскольку схема двигателя является новой, работ, посвящённых исследованию (в том числе, кинематическому) подобных конструкций ДВС, не встречается и, соответственно, инструментарий расчета (в том числе, кинематического) таких двигателей отсутствует.

Вместе с тем, кинематическое исследование (определение кинематических параметров) двигателя необходимо для перехода к последующим этапам его разработки – теоретическим и расчетно-конструкторским, – основными из которых являются расчет рабочих процессов (в части выявления зависимости величины удельного объема рабочего тела от положения лопа

сти в течение цикла) и сил, действующие в двигателе, анализ уравновешенности и уравновешивание, а также обеспечение равномерности хода и определение маховых масс.

СОКРАЩЕНИЯ И УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ, ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ КОНСТРУКТИВНАЯ И КИНЕМАТИЧЕСКАЯ РАСЧЕТНАЯ СХЕМЫ ЛДВС С ККППМ

Сокращения и условные обозначения, используемые в тексте, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сокращения и условные обозначения, используемые при анализе кинематики ЛДВС с ККППМ

<i>Сокращения</i>	
град. ПВ	градусы поворота вала
ККППМ	кривошипно-кулисный параллелограммный преобразующий механизм
ЛД	лопастной двигатель
ПВ	поворот вала
<i>Условные обозначения</i>	
s	смещение оси сердечника относительно оси верхнего кривошипа, м
j_{xk}	ускорение кулисы по оси x , m/c^2
j_{xp}	ускорение ползуна по оси x , m/c^2
j_{yk}	ускорение кулисы по оси y , m/c^2
j_{yp}	ускорение ползуна по оси y , m/c^2
n	частота вращения кривошипа (вала, валов), $мин^{-1}$ (об/мин)
N	целое положительное число ($N = 1, 2, 3, \dots$)
r	радиус кривошипа, м
l	длина хвостовика, м
v_{xk}	скорость кулисы по оси x , м/с
v_{xp}	скорость ползуна по оси x , м/с
v_{yk}	скорость кулисы по оси y , м/с
v_{yp}	скорость ползуна по оси y , м/с
x_k	перемещение кулисы по оси x , м
x_p	перемещение ползуна по оси x , м
y_k	перемещение кулисы по оси y , м
y_p	перемещение ползуна по оси y , м
y_{pmax}	максимальное вертикальное перемещение ползуна
α	угол поворота вала, и хотя с точки зрения кинематики ведущий и ведомый валы равнозначны, имеется в виду угол поворота ведущего (нижнего по кинематической схеме) вала, град. ПВ
$\alpha_{0j, \Delta v}$	угол нулевых значений функции вертикального ускорения и экстремальных значений функции вертикальной скорости ползуна, град. ПВ
β	угол отклонения хвостовика (сердечника) текущий, град
$\beta_{пп}$	угол поворота ползуна относительно оси хвостовика, град
β_{max}	максимальный угол отклонения хвостовика, град
γ	угол отклонения лопасти, град
ε_p	угловое ускорение ползуна, c^{-2}
ε_c	угловое ускорение сердечника, c^{-2}
λ	отношение радиуса кривошипа к длине хвостовика
ω	угловая скорость кривошипа, c^{-1}
ω_p	угловая скорость ползуна, c^{-1}
ω_c	угловая скорость сердечника, c^{-1}

Принципиальная конструктивная и соответствующая кинематическая расчетная схемы ЛДВС с ККППМ представлены на рис. 1.

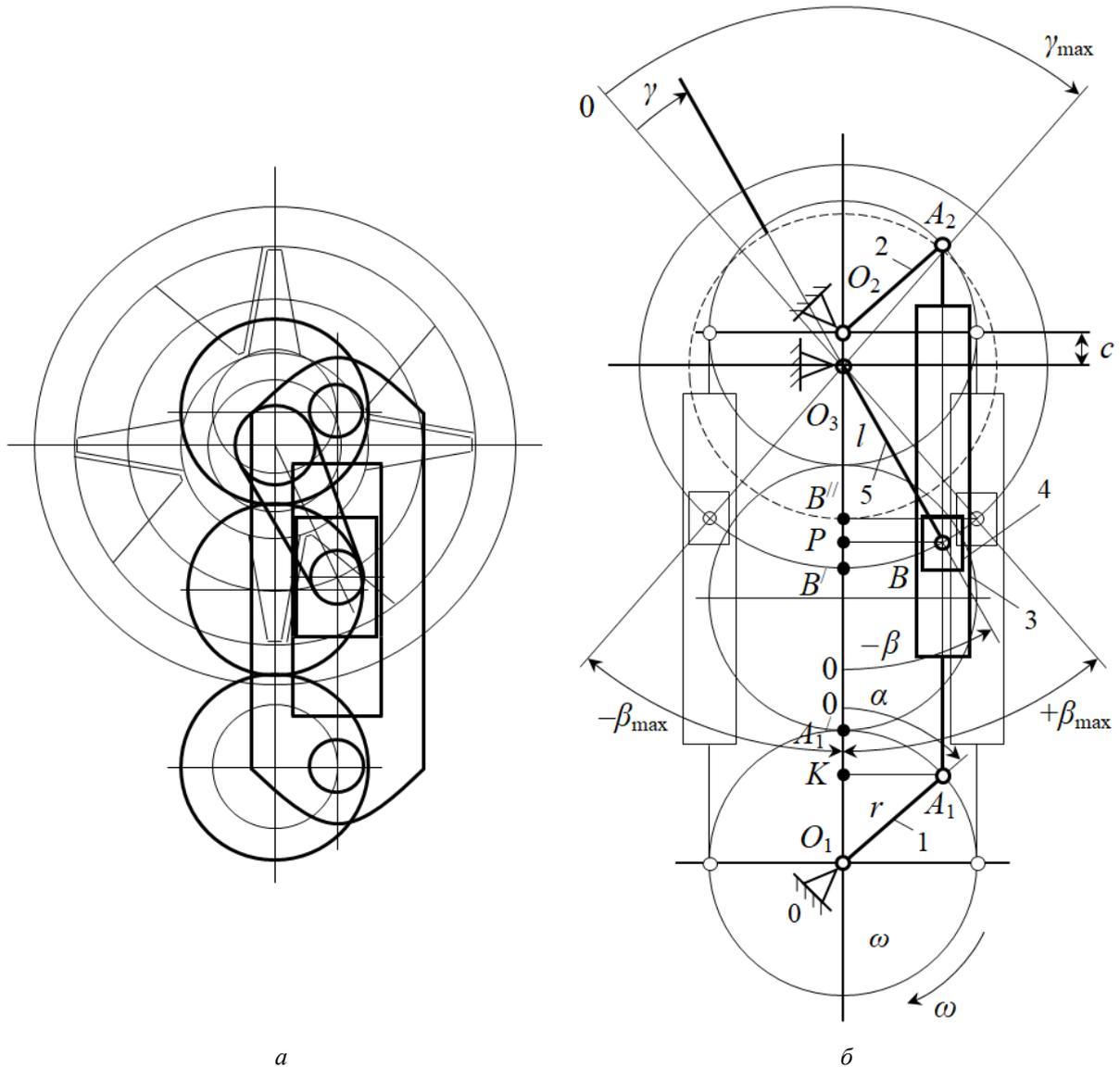


Рис. 1. Конструктивная (а) и кинематическая расчетная (б) схемы ЛДВС с ККППМ:
0 – основание (корпус); 1, 2 – кривошипы; 3 – кулиса; 4 – ползун; 5 – хвостовик (сердечник)

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

За начальное принято положение механизма, в котором кривошипы направлены по вертикальной оси вверх. При этом $\alpha = 0$, $\beta = 0$. К тому же, это – положение симметрии механизма (одно из двух положений).

Положительное направление ω – по часовой стрелке.

Положительное направление вращения сердечника – в ту же сторону, что и ω : по часовой стрелке; соответственно, положительное направление перемещения лопасти – вправо.

Определению подлежат законы движения следующих звеньев механизма:

- кривошип (кривошипы);
- лопасть (сердечник, хвостик);
- кулиса;
- ползун.

Начальное (входное) звено кинематической цепи – кривошип, закон его движения при определении (исследовании) кинематических свойств механизма задается (считается известным). Выходное звено – лопасть.

КИНЕМАТИКА КРИВОШИПА

Закон движения кривошипа задается как

$$\omega = \text{const.}$$

Остальные выражения, характеризующие движение кривошипа, запишутся в виде:

$$\alpha = \omega t = bnt;$$

$$\varepsilon = 0.$$

Здесь $\omega = \frac{\pi n}{30}$.

КИНЕМАТИКА СЕРДЕЧНИКА И ЛОПАСТИ

1). Угол отклонения хвостовика (сердечника) β .

Так как положительное направление перемещения лопасти – вправо, положительное направление перемещения хвостовика – влево; соответственно, положительное направление отсчета β – влево, отрицательное – вправо, поэтому на кинематической расчетной схеме угол отклонения хвостовика имеет обозначение « $-\beta$ ».

Рассматривая тригонометрические функции (в частности, синусы) углов α и β и вводя параметр

$$\lambda = \frac{r}{l},$$

получаем:

$$\sin \beta = -\lambda \sin \alpha,$$

откуда

$$\beta = -\arcsin(\lambda \sin \alpha) \quad (1)$$

Из (1) следуют выводы:

1. При уменьшении λ (при увеличении l относительно r) β_{max} уменьшается;
2. r не может быть больше l : при $r > l$ механизм будет неработоспособен, что очевидно; к тому же: область определения $\arcsin D(\arcsin \varphi) = [-1; 1]$, и область значений $\arcsin E(\arcsin \varphi) = \left[-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right]$.

Графики β в функции α для двух значений λ представлены на рис. 2.

Зависимость β_{max} от λ имеет вид

$$|\beta_{max}| = |\arcsin \lambda| \quad (2)$$

и ее график приведен на рис. 3.

2). Угол отклонения лопасти γ .

Для расчета рабочих процессов (при определении зависимости величины удельного объема рабочего тела от положения лопасти) целесообразно отсчитывать угол отклонения лопасти от нуля в одном из ее крайних положений до максимума в другом, поэтому с учетом положительного направления отклонения лопасти в крайнем левом (по схеме, рис. 1) положении угол отклонения лопасти равен нулю, в крайнем правом – максимален.

Тогда

$$\gamma = |\beta_{max}| = |\arcsin \lambda \arcsin(\lambda \sin \alpha)| \quad (3)$$

где $\alpha = [90...270]$ град. ПВ.

Интервал углов $\alpha = [90...450...810]$ град. ПВ определяет рабочий цикл, осуществляемый с левой (по схеме) стороны лопасти.

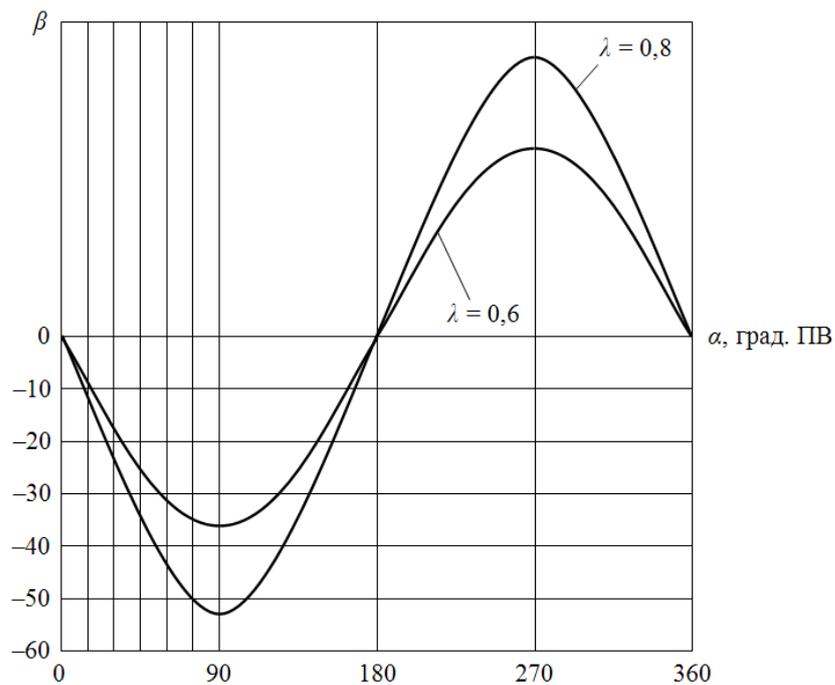


Рис. 2. Графики $\beta = f(\alpha)$

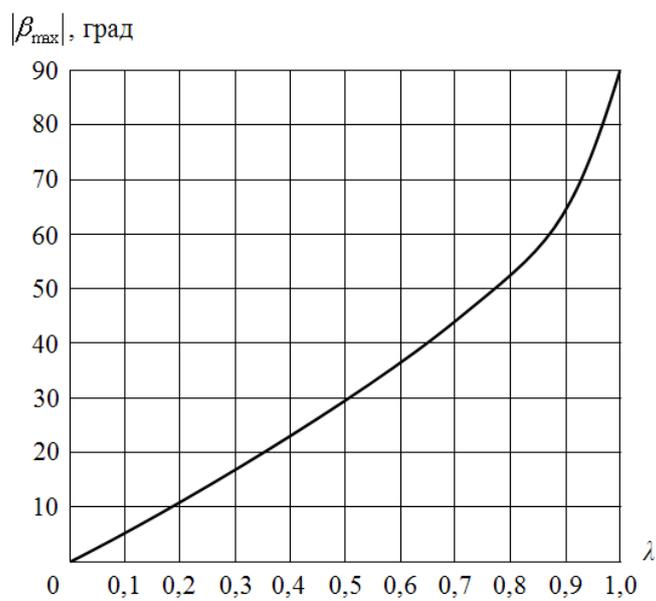


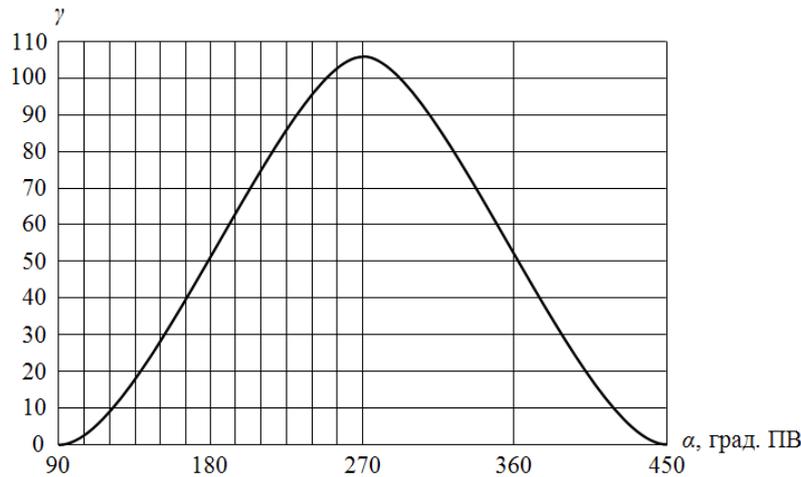
Рис. 3. График $\beta_{\max} = f(\lambda)$

Из (2) и (3) следует:

$$\gamma |\beta_{\max}| |\arcsin \lambda|_{\max};$$

$$\lambda = \sin \frac{\gamma_{\max}}{2}.$$

График γ в функции α при $\lambda = 0,8$ показан на рис. 4.

Рис. 4. График $\gamma = f(\alpha)$ при $\lambda = 0,8$

3). Угловая скорость сердечника ω_c .

$$\omega_c = \frac{d\beta}{dt} = \omega \frac{d\beta}{d\alpha} = \omega \frac{d}{d\alpha} (-\arcsin(\lambda \sin \alpha)) = -\lambda \omega \frac{\cos \alpha}{\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha}}.$$

Пусть

$$\chi = \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha}.$$

Тогда

$$\omega_c = -\frac{\lambda}{\chi} \omega \cos \alpha.$$

Графики ω_c в функции α при двух значениях λ и, условно, $\omega = 1$ приведены на рис. 5.

Угловая скорость положительна, если ее вектор направлен в сторону положительного направления отклонения лопасти – по часовой стрелке.

4). Угловое ускорение сердечника ε_c .

$$\begin{aligned} \varepsilon_c &= \frac{d\omega_c}{dt} = \omega \frac{d\omega_c}{d\alpha} = \omega \frac{d}{d\alpha} \left(-\lambda \omega \frac{\cos \alpha}{\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha}} \right) = \\ &= -\frac{\lambda \omega^2 \sin \alpha}{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha} \left(\lambda^2 \frac{\cos^2 \alpha}{\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha}} - \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha} \right) = -\frac{\lambda \omega^2}{\chi^2} \sin \alpha \left(\frac{\lambda^2}{\chi} \cos^2 \alpha - \chi \right). \end{aligned}$$

Графики ε_c в функции α при двух значениях λ и, условно, $\omega = 1$ приведены на рис. 6.

Угловое ускорение положительно, если его вектор направлен в сторону положительного направления отклонения лопасти – по часовой стрелке.

КИНЕМАТИКА КУЛИСЫ

Начальным положением кулисы является положение кулисы в начальном положении механизма. В начальном положении кулисы ее координаты (координаты точки A_1) равны нулю: $x_k = 0$, $y_k = 0$.

Кулиса совершает плоскопараллельное движение (включающее две возвратно-поступательные составляющие) в координатах:

$$(x_k; y_k) \rightarrow (KA_1; A_1/K).$$

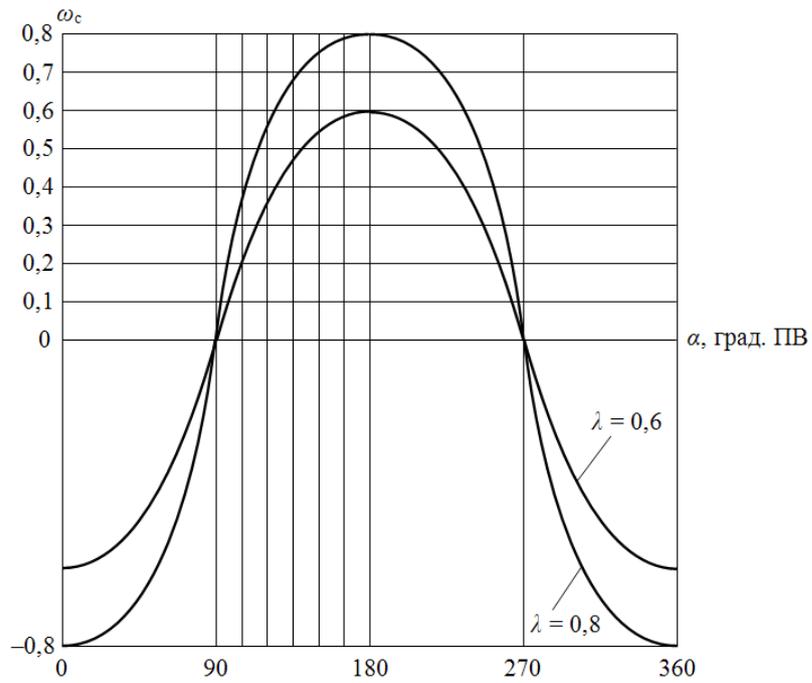


Рис. 5. Графики $\omega_c = f(\alpha)$

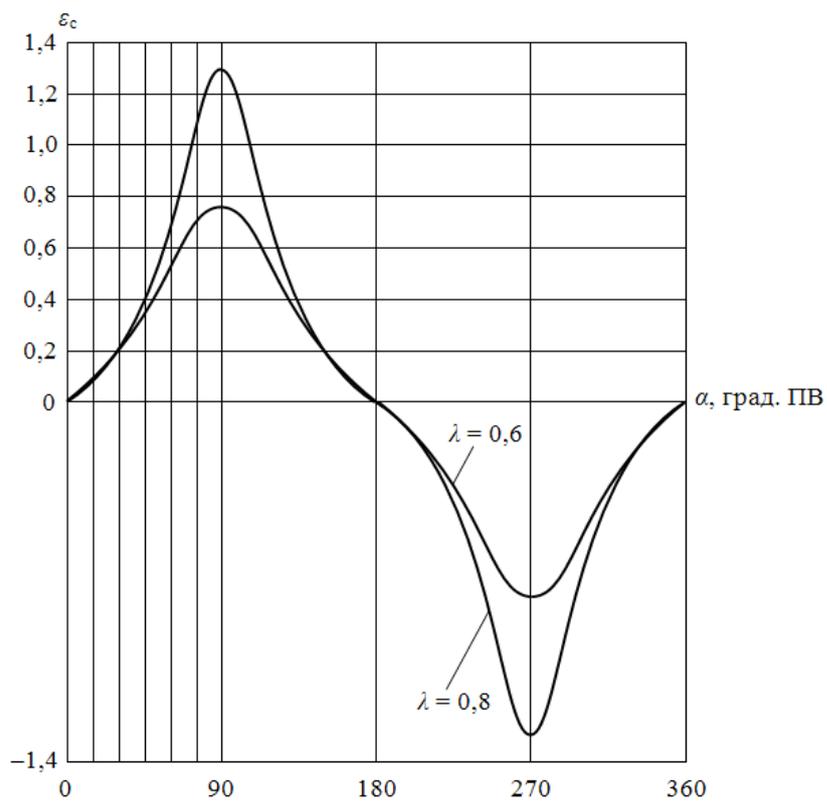


Рис. 6. Графики $\varepsilon_c = f(\alpha)$

1). Перемещение кулисы.

$$x_k = r \sin \alpha.$$

Положительное направление оси x вправо.

$$y_k = r(1 - \cos \alpha).$$

Положительное направление оси y вниз.

Графики перемещения кулисы по осям в функции α при, условно, $r = 1$ приведены на рис. 7.

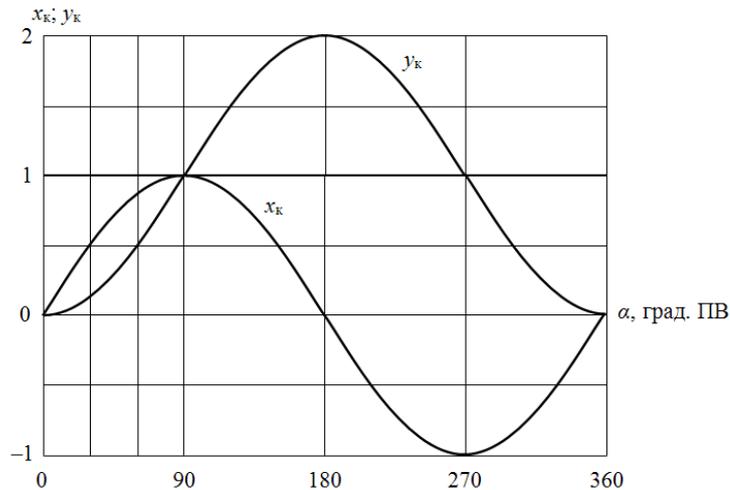


Рис. 7. Графики $x_k = f(\alpha)$, $y_k = f(\alpha)$

2). Скорость кулисы.

$$v_{x_k} = \omega \frac{dx_k}{d\alpha} = r\omega \cos \alpha.$$

$$v_{y_k} = \omega \frac{dy_k}{d\alpha} = r\omega \sin \alpha.$$

Графики скорости кулисы по осям в функции α при, условно, $\omega = 1$, $r = 1$ приведены на рис. 8.

3). Ускорение кулисы.

$$j_{x_k} = \omega \frac{dv_{x_k}}{d\alpha} = -r\omega^2 \sin \alpha.$$

$$j_{y_k} = \omega \frac{dv_{y_k}}{d\alpha} = r\omega^2 \cos \alpha.$$

Графики ускорения кулисы по осям в функции α при, условно, $\omega = 1$, $r = 1$ приведены на рис. 9.

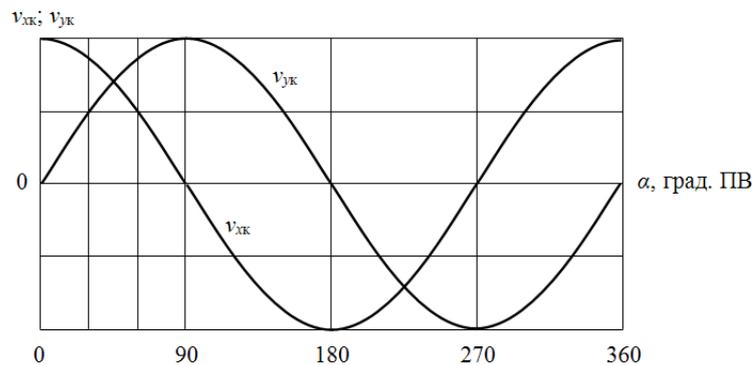


Рис. 8. Графики $v_{x_k} = f(\alpha)$, $v_{y_k} = f(\alpha)$

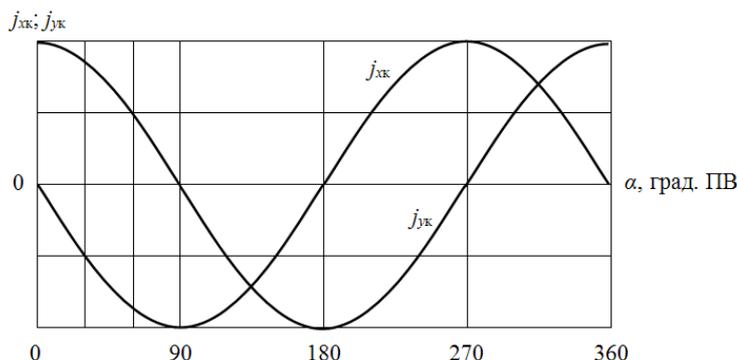


Рис. 9. Графики $j_{xk} = f(\alpha)$, $j_{yk} = f(\alpha)$

КИНЕМАТИКА ПОЛЗУНА

В абсолютной системе координат, связанной с основанием, ползун совершает сложное плоскопараллельное движение, включающее два составляющих простых движения:

1. Возвратно-поступательное по оси x ;
2. Возвратно-поступательное по оси y .

То есть, координаты ползуна: $(x_n; y_n) \rightarrow (BP; O_3P^*)$.

* Поскольку задача состоит в определении закона, а не траектории движения ползуна в системе координат с центром O_1 , координатой y_n может служить не

$$O_1P = (O_1O_2 - O_2O_3 - O_3P) = 4r - c - l\chi,$$

а O_3P .

- 1). Перемещение ползуна.

$$x_n = BP = l \sin \beta = r \sin \alpha.$$

Положительное направление оси x то же, что и для x_k , – вправо.

Формула и графики x_n аналогичны таковым для x_k , что естественно, т.к. в горизонтальной составляющей движения ползун участвует вместе с кулисой и, следовательно, точно так же (в отношении законов горизонтального движения), как и кулиса.

Значит:

$$v_{x_n} = \omega r \cos \alpha;$$

$$j_{x_k} = -\omega^2 r \sin \alpha.$$

Перемещение ползуна по оси y :

$$y_n = O_3P = l\chi = \frac{r}{\lambda}\chi.$$

На рис. 10 приведены графики: $y_n = l\chi$ при, условно, $l = 1$ (а); $y_n = \frac{r}{\lambda}\chi$ при, условно, $r = 1$ (б).

Как следует из уравнения и графика, представленного на рис. 10, а, положительное направление оси y в системе координат с центром O_3 – вниз.

Из этого же графика видно, что:

- при $\alpha = 0$ град. ПВ $\beta = 0$ и координата y_n максимальна (ползун находится на максимальном вертикальном удалении от плоскости оси сердечника) и равна l ;
- при $\alpha = 90$ град. ПВ $\beta = \beta_{\max}$ и координата y_n минимальна (ползун находится на минимальном вертикальном удалении от плоскости оси сердечника).

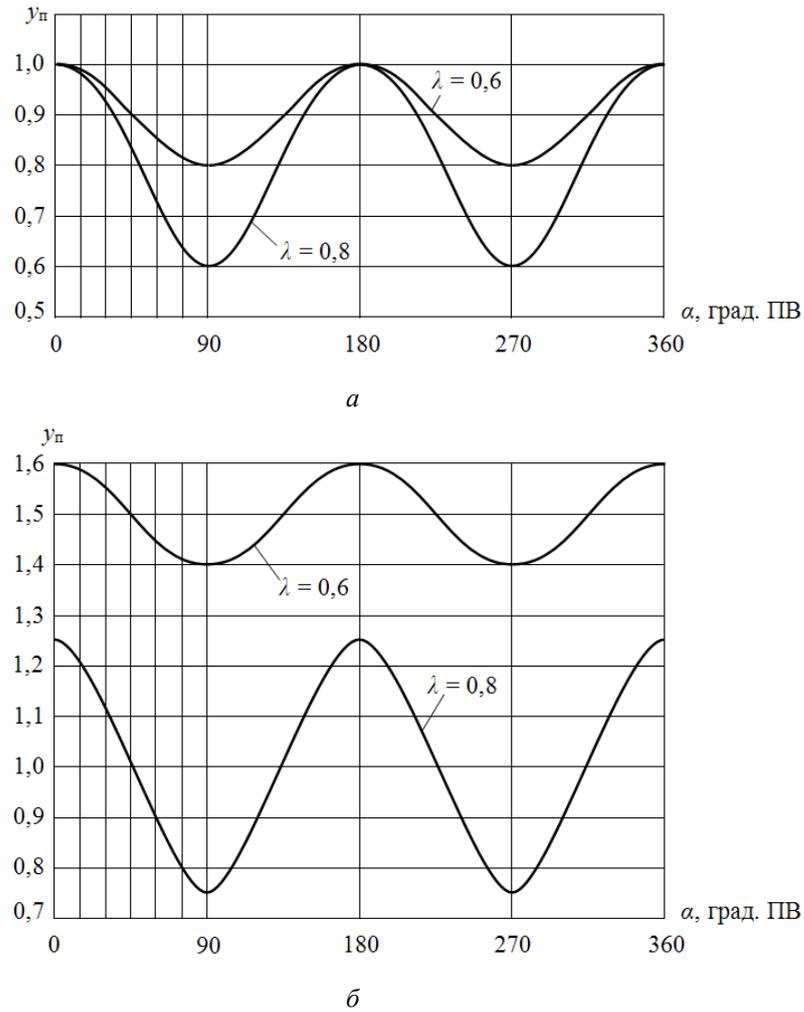


Рис. 10. Графики $y_n = f(\alpha)$

Если вывод уравнения вертикального перемещения ползуна производить в системе координат с центром в точке B' (при нуле в положении хвостовика вертикально вниз), это будет выглядеть следующим образом:

$$y_n = B'/P = O_3B' - O_3P = \frac{r}{\lambda} \left(1 - \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha} \right) = \frac{r}{\lambda} (1 - \chi).$$

y_n при этом будет изменяться от 0 до, например, при $\lambda = 0,8$ 0,4*l*.

Форма графиков скорости и ускорения не изменится, поменяться могут только знаки на противоположные.

Максимальное перемещение ползуна

$$y \left(1 - \sqrt{1 - \lambda^2} \right) \frac{r}{\lambda} \left(1 - \sqrt{1 - \lambda^2} \right)_{n_{max}}.$$

На рис. 11 представлены графики $y_{n_{max}} = f(\lambda)$:

– (а) – по выражению $y \left(1 - \sqrt{1 - \lambda^2} \right)_{n_{max}}$ при, условно, $l = 1$;

– (б) – по выражению $y \frac{r}{\lambda} \left(1 - \sqrt{1 - \lambda^2} \right)_{n_{max}}$ при, условно, $r = 1$.

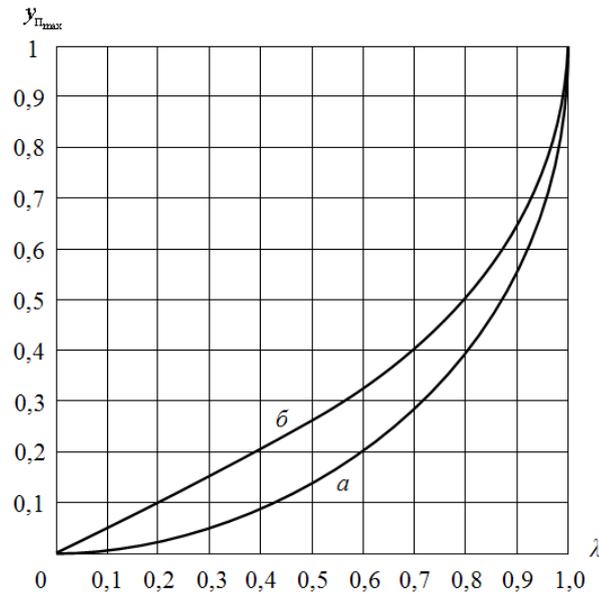


Рис. 11. Графики $y_{\text{max}} = f(\lambda)$

2). Вертикальная скорость ползуна.

$$v_{y_n} = \omega \frac{dy_n}{d\alpha} = \omega \frac{d}{d\alpha} \left(l \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha} \right) = -\frac{\omega l \lambda^2}{\chi} \sin \alpha \cos \alpha = -\frac{\omega r \lambda}{\chi} \sin \alpha \cos \alpha.$$

График v_{y_n} в функции α при $\lambda = 0,8$, $\omega = 1$, $l = 1$ представлен на рис. 12.

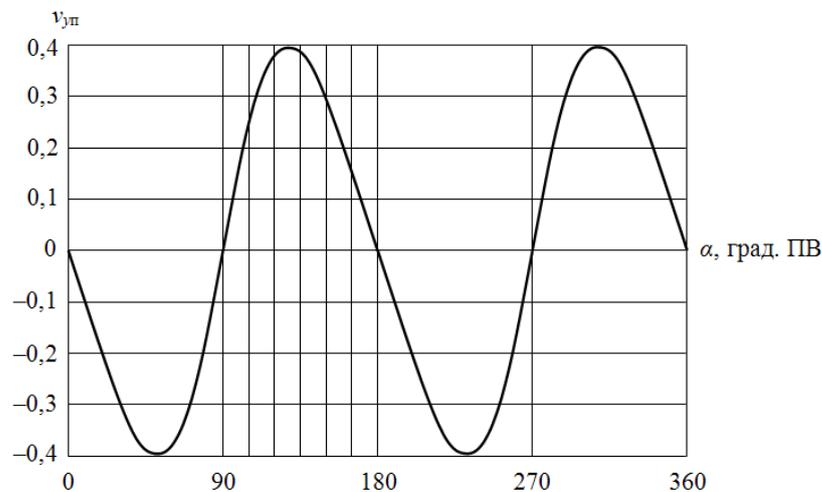
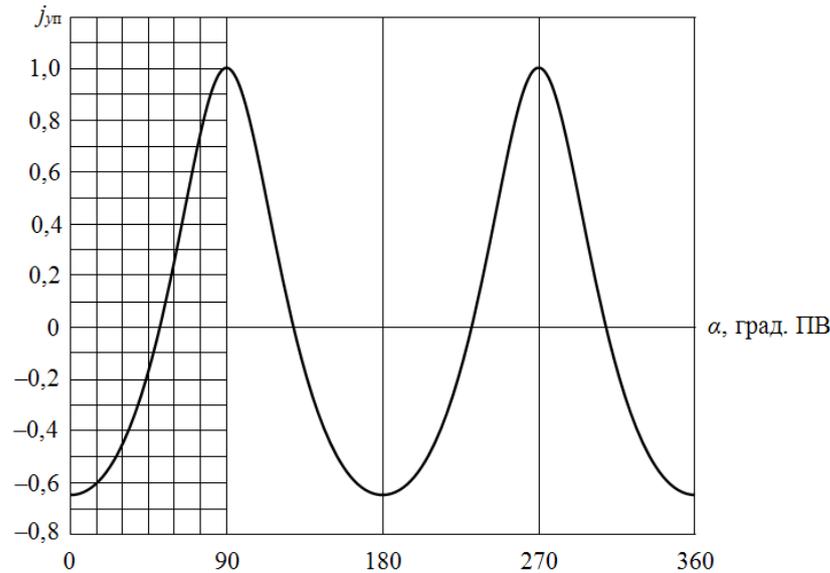


Рис. 12. График $v_{y_n} = f(\alpha)$

3). Вертикальное ускорение ползуна.

$$\begin{aligned} j_{y_n} &= \omega \frac{dv_{y_n}}{d\alpha} = \omega \frac{d}{d\alpha} \left(-\omega l \lambda^2 \frac{\sin \alpha \cos \alpha}{\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha}} \right) = \\ &= -\frac{l \omega^2 \lambda^2}{\chi^2} \left(\chi \cos 2\alpha + \frac{\lambda^2}{4\chi} \cdot \sin^2 2\alpha \right) = -\frac{r \lambda \omega^2}{\chi^2} \left(\chi \cos 2\alpha + \frac{\lambda^2}{4\chi} \cdot \sin^2 2\alpha \right) \end{aligned} \quad (4)$$

График j_{y_n} в функции α при $\lambda = 0,8$, $\omega = 1$, $l = 1$ представлен на рис. 13.

Рис. 13. График $j_{yn} = f(\alpha)$

Вообще, не принципиально, в какой системе координат (связанной, естественно, с основанием) выводить закон движения ползуна: с центром O_1 , O_3 или B при $\beta = 0$ (условной точкой B , «привязанной» к вертикальной оси механизма в положении хвостовика по этой оси вниз). Полученный закон движения в виде перемещения ползуна y_n графически будет представлен одной и той же кривой, которая в зависимости от выбранной системы координат может быть отзеркалена или смещена по вертикальной или горизонтальной оси на постоянную величину: по вертикали определяемую геометрическими параметрами механизма (r , l и c), по горизонтали равную 90 град. ПВ. При дифференцировании все эти «константы смещения графика» «уйдут в нули», и в любом случае (в любой системе координат) графики и скорости, и ускорения будут также принципиально взаимно одинаковы с учетом той же оговорки о смещениях. Поэтому все способы (относительно указания системы координат) вывода закона движения (в виде y_n) равноценны; принятый же в настоящем случае – в системе координат с центром O_3 – выбран из практических соображений наглядности в части «привязки» ползуна к наиболее «логичной» в этом отношении части (детали) механизма – хвостовику. При необходимости определения координаты или траектории движения в другой системе координат (с другим центром) учитывается смещение этих систем.

4). Угол поворота ползуна $\beta_{пп}$.

В относительной системе координат, связанной с хвостовиком, ползун, кроме того, совершает колебательное движение, представляющее собой поворот (качание) относительно оси хвостовика O_3B , характеризующее углом отклонения $\beta_{пп}$ продольной оси ползуна от оси хвостовика.

При этом, как следует из кинематической схемы, $\beta_{пп}$ изменяется зеркально по отношению к β , а следовательно, подчиняется тем же законам, что и угол β , но с учетом смены знака.

5). Положения экстремумов функции v_{yn} и, соответственно, нулей функции j_{yn} .

В (4) $j_{yn} = 0$, когда

$$\chi \cos 2\alpha + \frac{\lambda^2}{4\chi} \cdot \sin^2 2\alpha = 0.$$

Это уравнение сводится к виду

$$\lambda^2 \sin^4 \alpha - 2 \sin^2 \alpha + 1 = 0 \quad (5)$$

для которого после подстановки $\sin^2 \alpha = x$ определяются два корня, один из которых недействительный. Решением (5) будет действительный корень

$$\alpha_{0j,\vartheta v} = \arcsin\left(\pm\sqrt{\frac{1-\sqrt{1-\lambda^2}}{\lambda^2}}\right) \pm \pi N.$$

Так, для графиков, представленных на рис. 12, 13

$$\alpha_{0j,\vartheta v} = \arcsin(\pm 0,791) = \pm 52,239 \pm \pi n \text{ град.}$$

Результаты программного моделирования кинематики ползуна приведены на рис. 14.

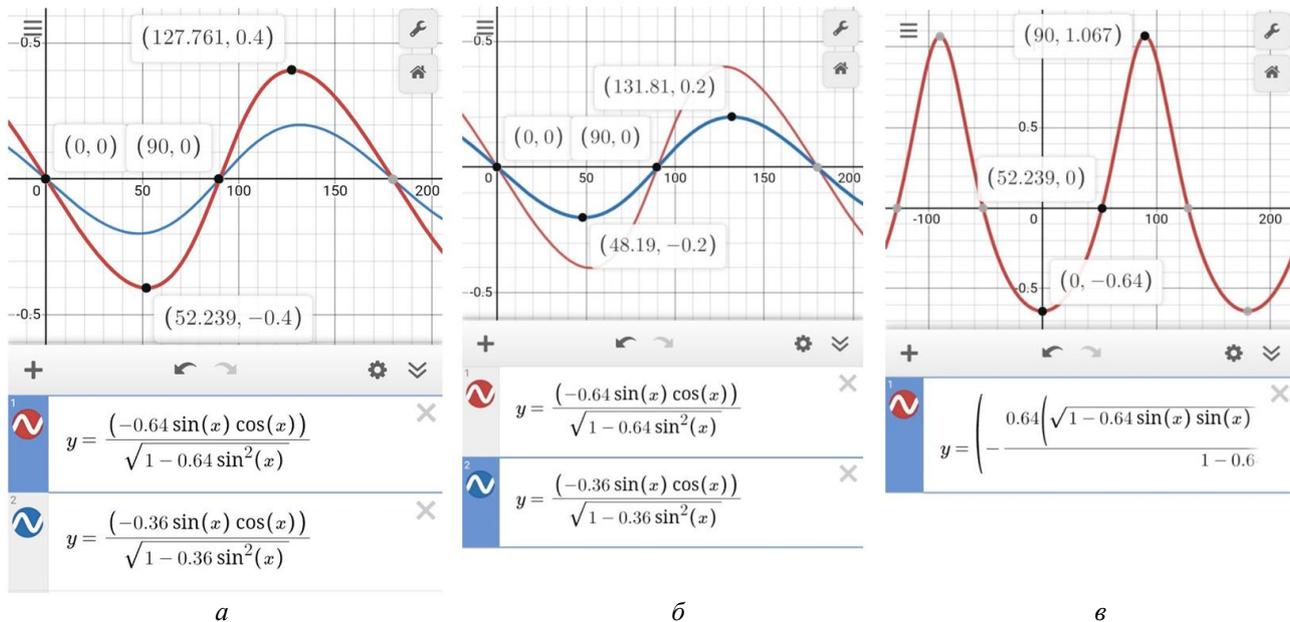


Рис. 14. Моделирование кинематики ползуна:

a – функция $v_{\text{уп}} = f(\alpha)$ при $\lambda = 0,8$; *б* – функция $v_{\text{уп}} = f(\alpha)$ при $\lambda = 0,6$; *в* – функция $j_{\text{уп}} = f(\alpha)$ при $\lambda = 0,8$

График $\alpha_{0j,\vartheta v} = f(\lambda)$ представлен на рис. 15.

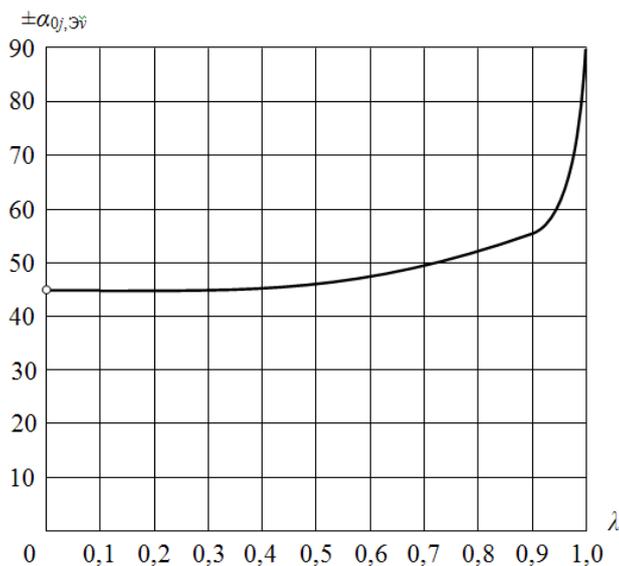


Рис. 15. График $\alpha_{0j,\vartheta v} = f(\lambda)$

Выводы

1. При $\lambda \rightarrow 0$ ($l \rightarrow \infty$) $\beta_{\max} \rightarrow 0 \Rightarrow$ вертикальная составляющая движения ползуна исчезает (вследствие малости β) \rightarrow у ползуна остается только горизонтальная составляющая движения, обусловленная ненулевым r , \Rightarrow кривая «оставшегося» ускорения ползуна $j_{\text{хп}}$ превращается в $j_{\text{хк}}$ (однопериодную, симметричную);

2. При $\lambda \rightarrow 1$ ($l \rightarrow r$) $\beta_{\max} \rightarrow 90$ град $\Rightarrow j_{\text{уп}}$ превращается в $j_{\text{ук}}$ (однопериодную, симметричную).

ОТНОСИТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ ПОЛЗУНА

1). Относительное перемещение ползуна (перемещение ползуна в кулисе относительно кулисы).

Закон движения (перемещение) ползуна определен в системе координат с центром O_3 , и его начальная (при $\alpha = 0$) координата по оси y (перемещение по оси y) ненулевая.

Закон движения (перемещение) кулисы определен в системе координат с центром A_1' , и ее начальная (при $\alpha = 0$) координата по оси y (перемещение по оси y) нулевая.

Для перехода к системе координат, связанной с кулисой, необходимо сместить систему с центром O_3 таким образом, чтобы начальная координата ползуна в новой системе была равна нулю: $l - y_n$.

$l - y_n$ – смещенная координата ползуна.

Относительная координата ползуна в кулисе (координата ползуна относительно кулисы при перемещении ползуна вдоль паза кулисы) определится алгебраическим сложением смещенных координат кулисы и ползуна:

$$y_{n_o} = r(1 - \cos \alpha) + \left(l - l\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha} \right) = r \left[(1 - \cos \alpha) + \frac{1}{\lambda} (1 - \chi) \right].$$

Графики y_{n_o} в функции α при двух значениях λ представлены на рис. 16.

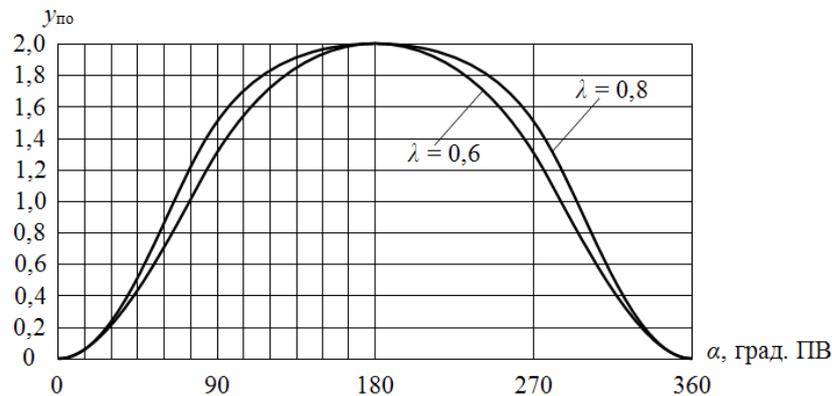


Рис. 16. График $y_{n_o} = f(\alpha)$

Положительное направление оси y в системе координат, связанной с кулисой, – вверх (в сторону верхнего кривошипа).

Пределы изменения относительного перемещения ползуна (как это и должно быть, естественно): $[0; 2r]$.

2). Относительная скорость ползуна.

$$\begin{aligned} v_{n_o} &= \omega \frac{dy_{n_o}}{d\alpha} = \omega \frac{d}{d\alpha} \left(r \left[(1 - \cos \alpha) + \frac{1}{\lambda} \left(1 - \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha} \right) \right] \right) = \\ &= \omega r \sin \alpha \left(1 + \frac{\lambda \cos \alpha}{\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha}} \right) = \omega r \sin \alpha \left(1 + \frac{\lambda}{\chi} \cos \alpha \right). \end{aligned}$$

Графики v_{no} в функции α при, условно, $r = 1$, $\omega = 1$ для двух значений λ представлены на рис. 17, результаты программного моделирования – на рис. 18.

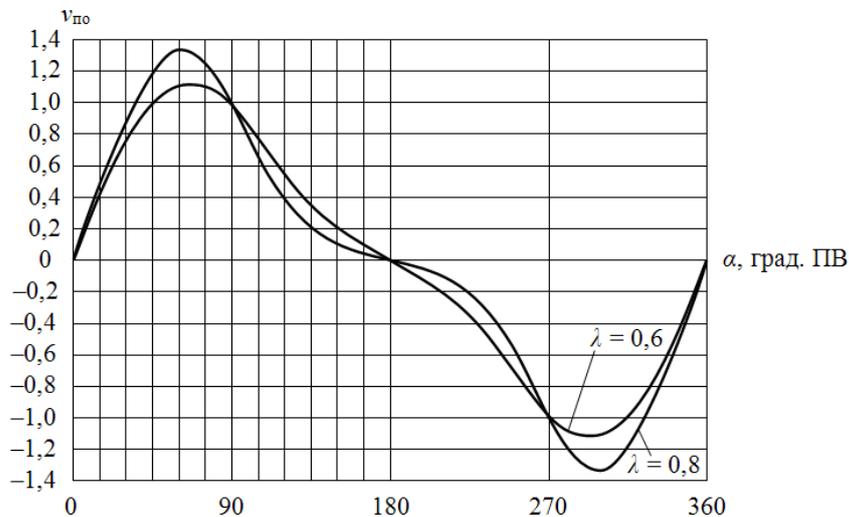


Рис. 17. График $v_{no} = f(\alpha)$

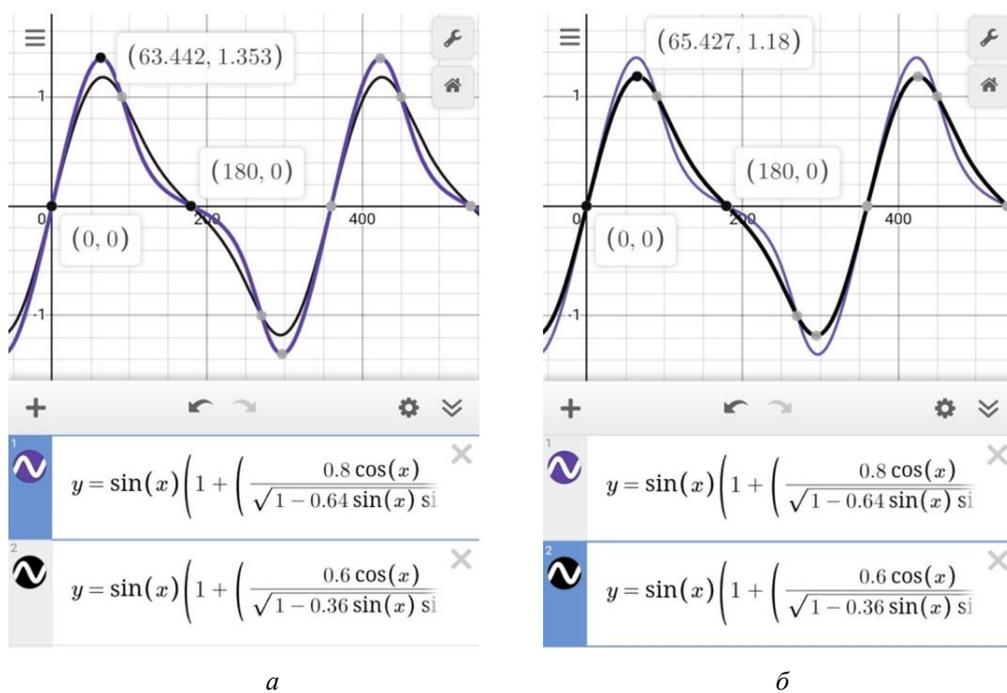


Рис. 18. Моделирование кинематики ползуна (относительная скорость) в относительном движении:
 а – функция $v_{no} = f(\alpha)$ при $\lambda = 0,8$; б – функция $v_{no} = f(\alpha)$ при $\lambda = 0,6$

3). Относительное ускорение ползуна.

$$j_{no} = \omega \frac{dv_{no}}{d\alpha} = \omega \frac{d}{d\alpha} \left(\omega r \sin \alpha \left(1 + \frac{\lambda \cos \alpha}{\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha}} \right) \right) =$$

$$= r \omega^2 \left[\cos \alpha \left(1 + \frac{\lambda}{\chi} \cos \alpha \right) - \frac{\lambda}{\chi} \sin^2 \alpha \left(1 - \frac{\lambda^2}{\chi^2} \cos^2 \alpha \right) \right];$$

Пусть

$$\mu = \frac{\lambda}{\chi} \cos \alpha,$$

тогда

$$j_{no} = r\omega^2 \left[(1 + \mu) \cos \alpha - \frac{\lambda}{\chi} (1 - \mu^2) \sin^2 \alpha \right].$$

Графики j_{no} в функции α при, условно, $r = 1, \omega = 1$ для двух значений λ представлены на рис. 19, результаты программного моделирования – на рис. 20.

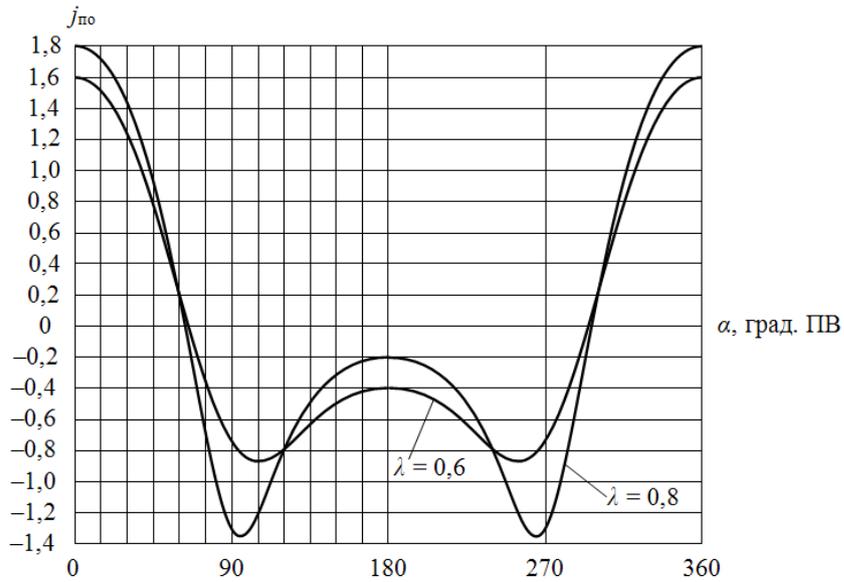


Рис. 19. График $j_{no} = f(\alpha)$

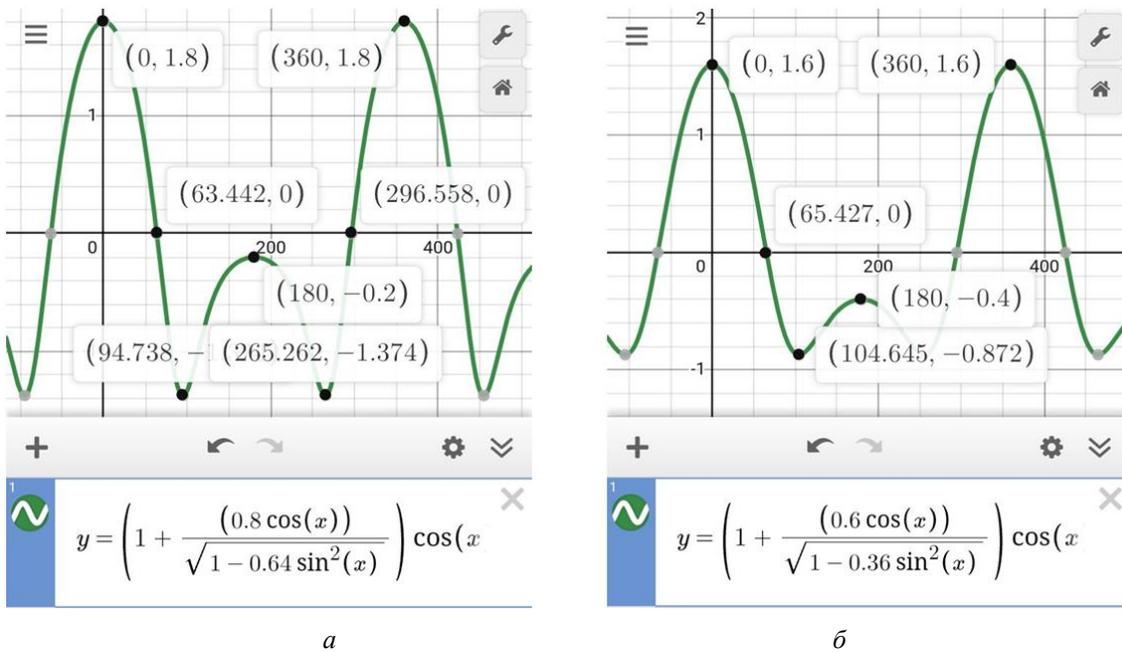


Рис. 20. Моделирование кинематики ползуна (относительное ускорение) в относительном движении:
 а – функция $j_{no} = f(\alpha)$ при $\lambda = 0,8$; б – функция $j_{no} = f(\alpha)$ при $\lambda = 0,6$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан инструментарий для кинематического расчета и анализа кривошипно-кулисного параллелограммного преобразующего механизма лопастного двигателя внутреннего сгорания.

Кинематическая схема и кинематика ЛДВС с ККППМ сложнее, чем у наиболее распространенных в настоящее время кривошипно-шатунных ДВС различных типов за исключением кривошипно-кулисно-рычажных конструкций, обеспечивающих управляемое движение поршней (и переменную степень сжатия) [10], что находит отражение при анализе уравновешенности и уравновешивании, а также в решении задач обеспечения равномерности хода и определения величин маховых масс кривошипно-кулисных параллелограммных преобразующих механизмов, как это будет показано в дальнейшем при рассмотрении вопросов динамики ККППМ. Вместе с тем, такие механизмы обладают и рядом существенных достоинств (как относительно кривошипно-шатунных ДВС, так и двигателей некоторых других схем [11–13]), которые будут подробно рассмотрены позднее.

Наличие и величина смещения (c) не влияют на кинематику, но, как будет также показано в динамике, обуславливают определенную геометрическую параметризацию механизма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попык К. Г. Динамика автомобильных и тракторных двигателей. Изд. 2-е, перераб. и доп. Учебник для вузов по специальности «Двигатели внутреннего сгорания». М.: Высш. школа, 1970. 328 с.
2. Ханин Н. С. Чистозвонов С. Б. Автомобильные роторно-поршневые двигатели. М.: МашГИЗ, 1964. 184 с.
3. Бениович В. С., Апазиди Г. Д., Бойко А. М. Ротопоршневые двигатели. М.: Машиностроение, 1968. 152 с.
4. Баландин С. С. Бесшатунные поршневые двигатели внутреннего сгорания. М.: Машиностроение, 1972. 176 с.
5. Герасимов Д. В. Анализ и синтез свободнопоршневых механизмов энергоустановок летательных аппаратов. Дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук. Самарский гос. аэрокосмический ун-т им. С.П. Королева. Самара, 2001. 124 с.
6. В Новой Зеландии придумали и собрали принципиально новый бесшумный двигатель (Электронный ресурс). URL: <https://2drive.ru/dvigatel-duke-engines/> (дата обращения 13.12.2022).
7. Клементьев В. В. Лопастной двигатель. Пат. RU 2697779 С1; F01C 9/00, F02B 55/02 (2006.01). Заявка № 2018123128, 25.06.2018; приоритет 25.06.2018; опубл. 19.08.2019. Бюл. № 23.
8. Клементьев В. В. Лопастной двигатель. Пат. RU 2700108 С1; F01C 9/00, F02B 53/00 (2006.01). Заявка № 2018120420, 01.06.2018; приоритет 01.06.2018; опубл. 12.09.2019. Бюл. № 26.
9. Клементьев В. В. Лопастной двигатель. Пат. RU 213237 U1; F01C 9/00, F02B 53/02 (2006.01). Заявка № 2021129342, 28.05.2021; приоритет 28.05.2021; опубл. 31.08.2022. Бюл. № 25.
10. Тер-Мкртчян Г. Г., Кутенев В. Ф., Яманин А. И. Вопросы теории двигателей с управляемым движением поршней с плоскими преобразующими механизмами. Москва: типография НАМИ, 2004. 240 с.
11. Клементьев В. В. Кинематика и динамика нетрадиционной бескривошипной поршневой тепловой машины: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: Спец. 05.04.02 – Тепловые двигатели. Юж.-Урал. гос. техн. ун-т, Каф. Двигатели внутр. сгорания; ЮУрГУ, Челябинск, 2002. 23 с.
12. Шароглазов Б. А. Бескривошипная поршневая тепловая машина–двигатель: кинематика, рабочий цикл, показатели цикла: монография / Б. А. Шароглазов, А. В. Гофман; Юж.-Урал. гос. ун-т, Каф. Двигатели внутр. Сгорания. Издательский Центр ЮУрГУ, 2014. 69 с.
13. Sharoglazov B. A., Klementev V. V Influence of Main Design Parameters of Motion Conversion Mechanism of Crankless Reciprocating Machine (Engine) on Torque Value on Output Shaft. Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). Volume I. Springer Nature Switzerland AG 2020. S. 523–533.

ОБ АВТОРЕ

КЛЕМЕНТЬЕВ Вадим Вениаминович, доц. каф. ДВСиЭСА. Дипл. инженер-двигателест (Челябинск. гос. технич. ун-т, 1996). Канд. техн. наук по тепл. двигателям (ЮУрГУ, 2002). Иссл. в обл. механики, кинематики, динамики, рабочих процессов ДВС оригинальных схем.

METADATA

Title: Kinematics of the crank-rocker parallelogram converting mechanism of a vane internal combustion engine.

Authors: V. V. Klementev¹

Affiliation:

¹ South Ural State University (national research university) (SUSU (NRU)), Russia.

Email: ¹ klementev-vadim@yandex.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), vol. 27, no. 2 (100), pp. 24-41, 2023. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The article presents the definition of the kinematic parameters (kinematics) of an internal combustion engine of a new design scheme (new type) - a vane internal combustion engine (ICE) with a crank-rocker parallelogram converting mechanism (CRPCM). The kinematics of the CRPCM links - the crank (cranks), the core and the blade, the wings, the slider are considered. The dependencies obtained in the course of kinematic modeling of VICE with KKPM are presented. Graphs are shown that reflect the nature of the change in the kinematic parameters of such an engine. Some parameters are determined that characterize the features of the kinematic scheme of the VICE with CRPCM.

Key words: vane internal combustion engine, crank-rocker converting mechanism, kinematics, kinematic parameter.

About authors:

KLEMENTEV, Vadim Veniaminovich, Docent, Dept. of Internal combustion engines. Dipl. Engineer (Chelyabinsk State Tech. Univ., 1996). Cand. of Tech. Sci. (SUSU, 2002).