

УДК 621.43.011

doi 10.54708/19926502_2024_28410618

Исследование динамики кривошипно-кулисного параллелограммного преобразующего механизма с двумя кривошипами лопастного двигателя в приложении к действующим силам

В.В. Клементьев

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

Аннотация. В статье представлен раздел динамики двигателей внутреннего сгорания, относящийся к двигателю новой конструктивной схемы (нового типа) – лопастному ДВС (ЛДВС) на основе кривошипно-кулисного параллелограммного преобразующего механизма (ККППМ) с двумя кривошипами – в части сил, действующих в двигателе. Рассмотрено определение действующих сил, приведены зависимости, полученные в ходе динамического моделирования, показаны графики динамических параметров, отражены некоторые параметрические особенности исследуемой схемы ЛДВС с ККППМ.

Ключевые слова: лопастной двигатель внутреннего сгорания, кривошипно-кулисный преобразующий механизм, динамика двигателя.

klementev-vadim@yandex.ru

Введение

Динамика двигателей внутреннего сгорания является одной из фундаментальных дисциплин, составляющих науку о поршневых и комбинированных тепловых двигателях.

Динамика ЛДВС на основе кривошипно-кулисного параллелограммного преобразующего механизма (ККППМ) с двумя кривошипами (ДК), или ЛДВС-ККППМ-ДК, как и динамика, например, кривошипно-шатунных ДВС, позволяет определить величины и характер изменения сил и моментов, действующих в двигателе, оценить уравновешенность двигателя и провести его уравновешивание, а также обеспечить необходимую равномерность хода.

Результаты динамических исследований служат основой последующих этапов конструирования, проектирования и доводки ДВС, в частности, прочностных расчетов.

Поскольку рассматриваемая схема двигателя является новой (например, [1]), инструментария динамических расчетов, равно как и научных работ, освещающих эту тематику, на данный момент не существует.

Вместе с тем, потребность в таких исследованиях имеется, так как ЛДВС с ККППМ потенциально обладает рядом существенных достоинств относительно, например, наиболее распространенных в настоящее время кривошипно-шатунных («традиционных») ДВС (двойное действие, благоприятные условия работы механизма по температуре, смазке, удельным нагрузкам, химической (газовой и жидкостной) среде, компоновке, возможности производства регулировок, обслуживанию и ремонту, возможность относительно простой конструктивной реализации переменной степени сжатия, простота сочленения лопастной части с механизмом и другие) и при должной научно-теоретической и инженерно-технической проработке конструкции может составить конкуренцию традиционным двигателям в определенных областях промышленности и хозяйства.

Сокращения и условные обозначения

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

Таблица 1. Сокращения и условные обозначения, используемые при анализе динамики ЛДВС с ККШМ.

<i>Сокращения</i>	
град. ПВ	градусы поворота вала
ЛДВС	лопастной двигатель внутреннего сгорания
Н.У.	нормальные условия (окружающей среды)
ПВ	поворот вала
<i>Условные обозначения</i>	
B	ширина лопасти, см (м)
F_l	площадь лопасти, м ²
H	высота лопасти, см (м)
i	число лопастей (рабочих камер) ЛДВС
K	сила, действующая по оси хвостовика, кН
$K_{jвр}$	составляющая силы $N_{jвр}$, направленная по оси хвостовика, кН
K_{Σ}	суммарная сила, действующая по оси хвостовика, кН
l	длина хвостовика, м
l_1	расстояние от линии действия боковой силы N до нижнего шарнира кулисы, м
l_1'	расстояние от центра масс до нижнего шарнира кулисы, м
l_2	расстояние от линии действия боковой силы N до верхнего шарнира кулисы, м
l_2'	расстояние от центра масс до верхнего шарнира кулисы, м
M_k	центр масс кулисы
m_k	масса кулисы, кг
$m_{кр}$	масса кривошипа, кг
m_c	масса сердечника, кг
m_x	масса хвостовика, кг
N	боковая сила (сила, действующая перпендикулярно боковой стенке паза кулисы), кН
N_1	часть боковой силы N , приходящаяся на нижний шарнир кулисы, кН
N_2	часть боковой силы N , приходящаяся на верхний шарнир кулисы, кН
$N_{1jвр}$	часть силы $N_{jвр}$, приходящаяся на нижний шарнир кулисы, кН
$N_{2jвр}$	часть силы $N_{jвр}$, приходящаяся на верхний шарнир кулисы, кН
$N_{jвр}$	нормальная (боковая) сила, направленная перпендикулярно продольной оси кулисы, обусловленная силами инерции вращающихся масс, кН
$N_{1\Sigma}$	суммарная боковая сила, действующая на нижний шарнир кулисы, кН
$N_{2\Sigma}$	суммарная боковая сила, действующая на верхний шарнир кулисы, кН
p	текущее давление рабочего тела в расчетной рабочей камере, МПа
p_0	атмосферное давление при Н.У., МПа (0,1013 МПа)
p'	текущее давление рабочего тела в смежной с расчетной рабочей камере (в двигателе двойного действия), МПа
P	нормальная сила давления газов, кН
P_r	сила давления газов, кН
$P_{ск}$	центробежная сила инерции кривошипа, кН
$P_{сх}$	центробежная сила инерции хвостовика, кН
$P_{jпс}$	сила инерции полусердечника, кН
P_{jc}	сила инерции сердечника, кН
P_{jx}	сила инерции хвостовика, кН
P_l	сила, действующая перпендикулярно оси хвостовика, кН
$P_{ljвр}$	составляющая силы $N_{jвр}$, направленная перпендикулярно хвостовику, кН

$P_{jкx}$	горизонтальная (направленная по оси x) составляющая силы инерции кулисы, кН
$P_{jкy}$	вертикальная (направленная по оси y) составляющая силы инерции кулисы, кН
P_{jc}'	сила инерции сердечника, приведенная к точке B , кН
$P_{ск}$	центробежная сила инерции кривошипа, кН
P_{jc}'	сила инерции сердечника, приведенная к точке B , кН
P_{jx}'	сила инерции хвостовика, приведенная к точке B , кН
$P_{I\Sigma}$	приведенная к точке B суммарная составляющая сил P и P_{jc}' , кН
$P_{1jкx}$	часть силы $P_{jкx}$, приходящаяся на нижний шарнир кулисы, кН
$P_{2jкx}$	часть силы $P_{jкx}$, приходящаяся на верхний шарнир кулисы, кН
$P_{1jкy}$	часть силы $P_{jкy}$, приходящаяся на нижний шарнир кулисы, кН
$P_{2jкy}$	часть силы $P_{jкy}$, приходящаяся на верхний шарнир кулисы, кН
P_{Σ}	суммарная составляющая сил P и P_{jc}' , кН
$q_{пс}$	расстояние от оси вращения до центра масс полусердечника, м
q_c	расстояние от оси вращения до линии действия центробежной силы инерции сердечника, м
q_x	расстояние от оси вращения до центра масс хвостовика, м
Q	сила, действующая по оси лопасти, кН
R	радиус тела сердечника, см (м)
r	радиус кривошипа, м
T	тангенциальная сила, кН
T_1	тангенциальная (направленная перпендикулярно нижнему кривошипу) составляющая силы N_1 , кН
T_2	тангенциальная (направленная перпендикулярно верхнему кривошипу) составляющая силы N_2 , кН
$T_{jвр}$	тангенциальная (направленная перпендикулярно кривошипу) составляющая силы $N_{jвр}$, кН
$T_{jкx}$	тангенциальная (направленная перпендикулярно кривошипу) составляющая силы $P_{jкx}$, кН
$T_{jкy}$	тангенциальная (направленная перпендикулярно кривошипу) составляющая силы $P_{jкy}$, кН
$T_{jк\Sigma}$	суммарная составляющая сил $T_{jкx}$ и $T_{jкy}$, кН
$T_{1jвр}$	тангенциальная (направленная перпендикулярно нижнему кривошипу) составляющая силы $N_{1jвр}$, кН
$T_{2jвр}$	тангенциальная (направленная перпендикулярно верхнему кривошипу) составляющая силы $N_{2jвр}$, кН
$T_{1jкx}$	тангенциальная (направленная перпендикулярно нижнему кривошипу) составляющая силы $P_{1jкx}$, кН
$T_{1jкy}$	тангенциальная (направленная перпендикулярно нижнему кривошипу) составляющая силы $P_{1jкy}$, кН
$T_{1jк\Sigma}$	суммарная составляющая сил $T_{1jкx}$ и $T_{1jкy}$, кН
$T_{2jкx}$	тангенциальная (направленная перпендикулярно верхнему кривошипу) составляющая силы $P_{2jкx}$, кН
$T_{2jкy}$	тангенциальная (направленная перпендикулярно верхнему кривошипу) составляющая силы $P_{2jкy}$, кН
$T_{2jк\Sigma}$	суммарная составляющая сил $T_{2jкx}$ и $T_{2jкy}$, кН
$T_{1\Sigma}$	суммарная тангенциальная (направленная перпендикулярно кривошипу) сила на нижнем кривошипе, кН
$T_{2\Sigma}$	суммарная тангенциальная (направленная перпендикулярно кривошипу) сила на верхнем кривошипе, кН
T_{Σ}	результатирующая (суммарная от двух кривошипов) тангенциальная (касательная) сила, действующая на ведущий кривошип, кН
Z	сила, действующая по оси нижнего кривошипа, кН

Продолжение Табл. 1

Z_1	составляющая силы N_1 , направленная по оси нижнего кривошипа, кН
Z_2	составляющая силы N_2 , направленная по оси верхнего кривошипа, кН
$Z_{jвр}$	составляющая силы $N_{jвр}$, направленная по оси кривошипа, кН
Z_{jkx}	составляющая силы P_{jkx} , направленная по оси кривошипа, кН
Z_{jky}	составляющая силы P_{jky} , направленная по оси кривошипа, кН
$Z_{jk\Sigma}$	суммарная составляющая сил Z_{jkx} и Z_{jky} , кН
$Z_{1jвр}$	составляющая силы $N_{1jвр}$, направленная по оси нижнего кривошипа, кН
$Z_{2jвр}$	составляющая силы $N_{2jвр}$, направленная по оси верхнего кривошипа, кН
Z_{1jkx}	составляющая силы P_{1jkx} , направленная по оси нижнего кривошипа, кН
Z_{1jky}	составляющая силы P_{1jky} , направленная по оси нижнего кривошипа, кН
$Z_{1jk\Sigma}$	суммарная составляющая сил Z_{1jkx} и Z_{1jky} , кН
Z_{2jkx}	составляющая силы P_{2jkx} , направленная по оси верхнего кривошипа, кН
Z_{2jky}	составляющая силы P_{2jky} , направленная по оси верхнего кривошипа, кН
$Z_{2jk\Sigma}$	суммарная составляющая сил Z_{2jkx} и Z_{2jky} , кН
$Z_{1\Sigma}$	суммарная сила, действующая по оси нижнего кривошипа, кН
$Z_{2\Sigma}$	суммарная сила, действующая по оси верхнего кривошипа, кН
Z_{Σ}	резльтирующая (суммарная от двух кривошипов) сила, действующая по оси кривошипа, кН
δ	угол наклона боковой поверхности лопасти к ее медианной плоскости, град
γ_{\max}	максимальный угол отклонения (качания) лопасти (сердечника), град
λ	отношение радиуса кривошипа к длине хвостовика
ω	угловая скорость кривошипа, c^{-1}

Газовые силы

Схема газовых сил приведена на Рис. 1.

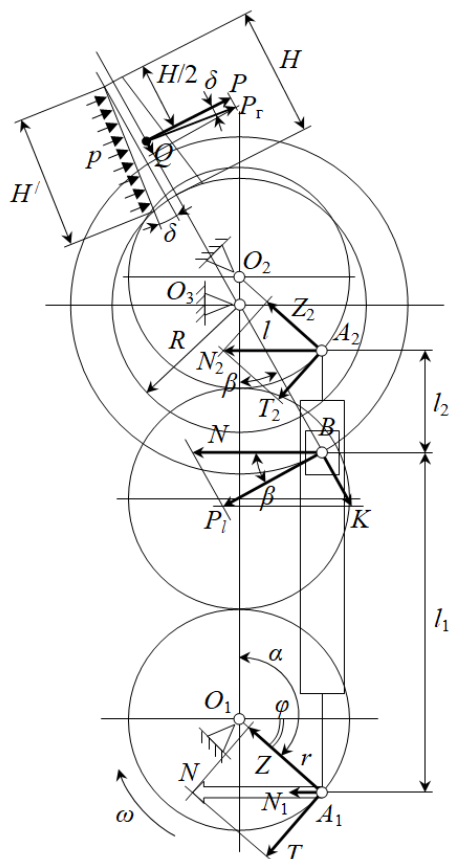


Рисунок 1. Схема газовых сил.

$$P_r = (p - p') F_n$$

где p' определяется как:

1. p_0 , если по другую сторону лопасти рабочий цикл не организуется (в ЛДВС одинарного действия);
2. p , сдвинутому (смещенному) на 360 град. ПВ в четырехтактном и на 180 град. ПВ в двухтактном двигателе, если с обеих сторона лопастей совершается рабочий цикл (в ЛДВС двойного действия).

Площадь лопасти:

$$F_n = \frac{B \cdot H}{\cos \delta}.$$

Сила давления газов, действующая на лопасть, положительна, если крутящий момент, создаваемый этой силой, также положителен (стремится повернуть выходной вал (кривошип, кривошпы) в ту же сторону, куда направлена ω , – по часовой стрелке); или сила P_r положительна, если ее действие стремится повернуть кривошип в сторону положительного направления ω (по часовой стрелке).

Таким образом,

$$P_r = (p - p') \frac{B \cdot H}{\cos \delta}.$$

В общем случае

$$P_r = (p - p') \frac{B \cdot H}{\cos \delta} \cdot i.$$

где i – число лопастей ЛДВС (или камер ЛДВС, в которых одновременно происходят одноименные процессы рабочего цикла).

$$P = P_r \cos \delta;$$

$$Q = P_r \sin \delta.$$

Условие определения P_l – равенство моментов сил P и P_l относительно оси вращения сердечника O_3 .

При этом (Рис. 2):

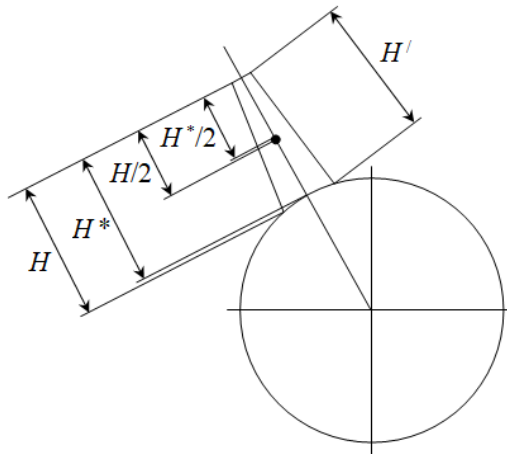


Рисунок 2. К определению точки приложения равнодействующей сил давления газов.

$$H > H^* \rightarrow \frac{H}{2} > \frac{H^*}{2}, \text{ однако даже при относительно больших } \delta \text{ (10–15}^\circ\text{) эта разница}$$

не столь значительна, она не учитывается и идет в запас прочности при расчете.

Тогда

$$l_1 = r \left(4 - \frac{1}{\lambda} \chi - \cos \alpha \right) - c ; l_2 = r \left(\frac{1}{\lambda} \chi + \cos \alpha \right) + c .$$

При этом очевидно, что (Рис. 4):

– амплитуды (A) l_1 и l_2 равны $2r$;

– для любого α $l_1 + l_2 = 4r$.

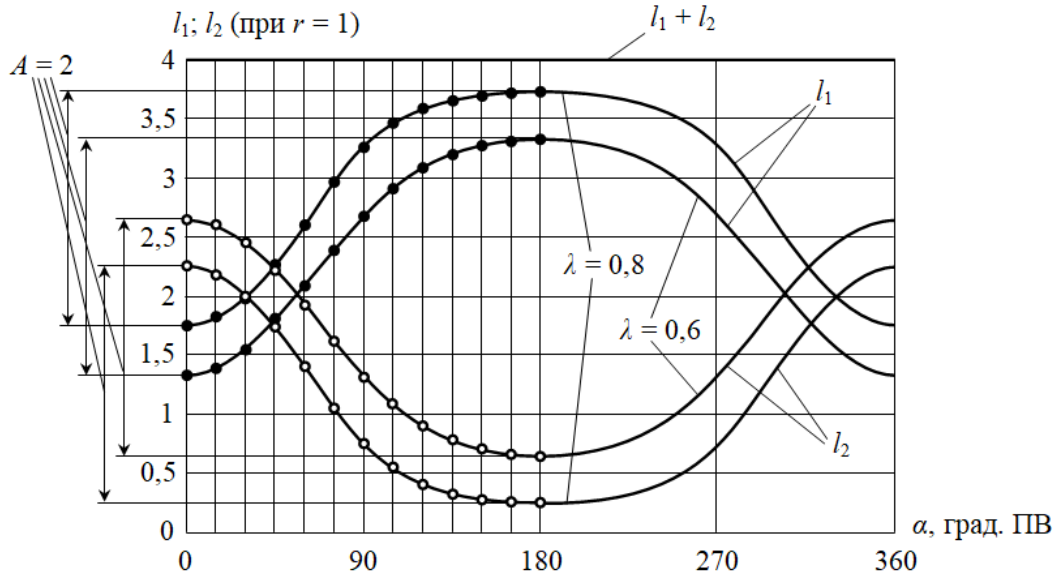


Рисунок 4. К определению l_1 и l_2 .

Значит:

$$N_1 = N \cdot \frac{l_2}{4r} = N \cdot \frac{1}{4r} \left(r \left(\frac{1}{\lambda} \chi + \cos \alpha \right) + c \right) = P_r \cdot \frac{\lambda \cos \delta}{4\chi r^2} \left(R + \frac{H}{2} \right) \left(r \left(\frac{1}{\lambda} \chi + \cos \alpha \right) + c \right) ;$$

$$N_2 = N \cdot \frac{l_1}{4r} = N \cdot \frac{1}{4r} \cdot \left[r \left(4 - \frac{1}{\lambda} \chi - \cos \alpha \right) - c \right] = P_r \cdot \frac{\lambda \cos \delta}{4\chi r^2} \left(R + \frac{H}{2} \right) \left[r \left(4 - \frac{1}{\lambda} \chi - \cos \alpha \right) - c \right] ;$$

$$N_1 + N_2 = N .$$

Тогда:

$$Z_1 = N_1 \sin \alpha = P_r \cdot \frac{\lambda \cos \delta}{4\chi r^2} \left(R + \frac{H}{2} \right) \left(r \left(\frac{1}{\lambda} \chi + \cos \alpha \right) + c \right) \sin \alpha ;$$

$$T_1 = -N_1 \cos \alpha = -P_r \cdot \frac{\lambda \cos \delta}{4\chi r^2} \left(R + \frac{H}{2} \right) \left(r \left(\frac{1}{\lambda} \chi + \cos \alpha \right) + c \right) \cos \alpha ;$$

$$Z_2 = N_2 \sin \alpha = P_r \cdot \frac{\lambda \cos \delta}{4\chi r^2} \left(R + \frac{H}{2} \right) \left[r \left(4 - \frac{1}{\lambda} \chi - \cos \alpha \right) - c \right] \sin \alpha ;$$

$$T_2 = -N_2 \cos \alpha = -P_r \cdot \frac{\lambda \cos \delta}{4\chi r^2} \left(R + \frac{H}{2} \right) \left[r \left(4 - \frac{1}{\lambda} \chi - \cos \alpha \right) - c \right] \cos \alpha .$$

Откуда

$$N = \frac{Z}{\sin \alpha} ; N_1 = \frac{Z_1}{\sin \alpha} ; N_2 = \frac{Z_2}{\sin \alpha} .$$

Аналогично:

$$N = -\frac{T}{\cos \alpha} ; N_1 = -\frac{T_1}{\cos \alpha} ; N_2 = -\frac{T_2}{\cos \alpha} .$$

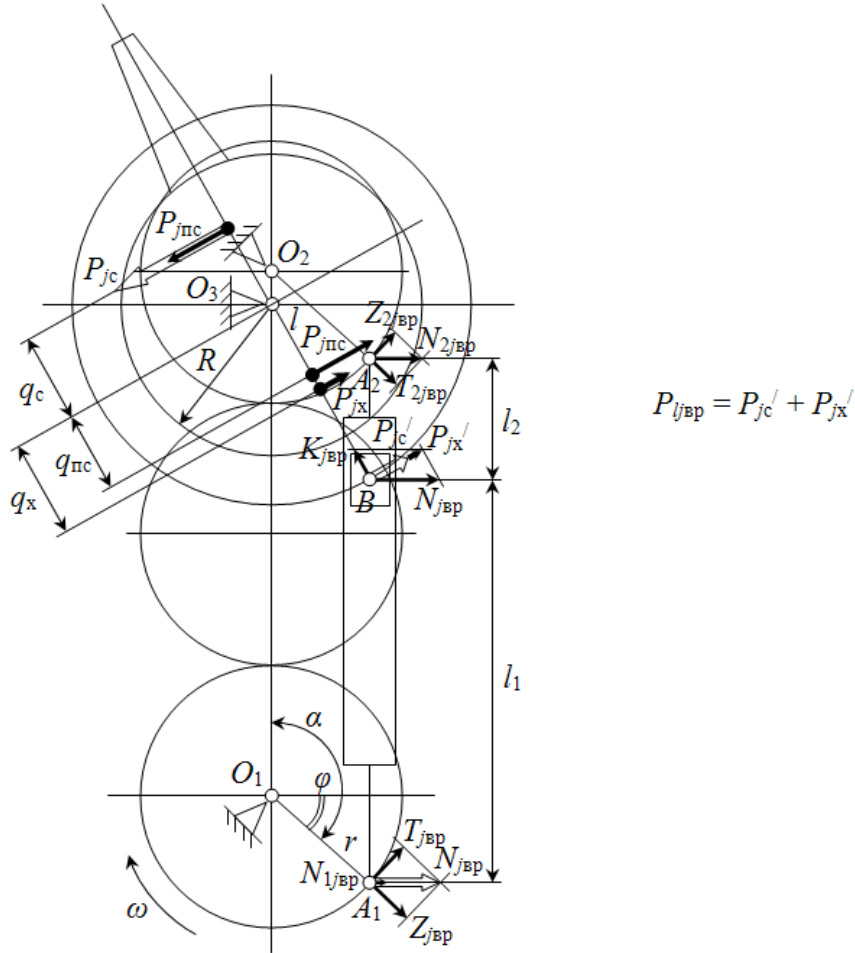
Справедливо также:

$$Z = Z_1 + Z_2 ; T = T_1 + T_2 .$$

Силы инерции вращающихся масс

Качание – частный случай вращения, или вращение с переменной скоростью, изменяющейся, например, по гармоническому закону.

Схема сил инерции вращающихся (качающихся) масс приведена на Рис. 5.



$$P_{ljvp} = P_{jc}' + P_{jx}'$$

Рисунок 5. Схема сил инерции вращающихся (качающихся) масс.

$$P_{jc} = P_{jnc} + P_{jxc} = 2P_{jnc} = -m_c q_c \varepsilon_c = -m_c q_c \frac{\lambda \omega^2}{\chi^2} \sin \alpha \left(\frac{\lambda^2}{\chi} \cos^2 \alpha - \chi \right)$$

$$P_{jx} = -m_x q_x \varepsilon_c = -m_x q_x \frac{\lambda \omega^2}{\chi^2} \sin \alpha \left(\frac{\lambda^2}{\chi} \cos^2 \alpha - \chi \right)$$

$$P_{jc}' = P_{jc} \frac{\lambda q_c}{r} ; P_{jx}' = P_{jx} \frac{\lambda q_x}{r} ; P_{ljvp} = \frac{\lambda}{r} (P_{jc} q_c + P_{jx} q_x) .$$

$$N_{jvp} = \frac{P_{ljvp}}{\chi} ; K_{jvp} = -P_{ljvp} \frac{\lambda \sin \alpha}{\chi} .$$

$$N_{1jvp} = N_{jvp} \frac{l_2}{4r} = N_{jvp} \cdot \frac{1}{4r} \left(\frac{r}{\lambda} \chi + \cos \alpha + c \right)$$

$$N_{2jvp} = N_{jvp} \frac{l_1}{4r} = N_{jvp} \cdot \frac{1}{4r} \cdot \left[r \left(4 - \frac{1}{\lambda} \chi - \cos \alpha \right) - c \right]$$

$$Z_{j_{\text{вп}}} = N_{j_{\text{вп}}} \sin \alpha = P_{j_{\text{вп}}} \frac{\sin \alpha}{\chi} ; T_{j_{\text{вп}}} = -N_{j_{\text{вп}}} \cos \alpha = -P_{j_{\text{вп}}} \frac{\cos \alpha}{\chi} .$$

$$Z_{1j_{\text{вп}}} = N_{1j_{\text{вп}}} \sin \alpha ; T_{1j_{\text{вп}}} = -N_{1j_{\text{вп}}} \cos \alpha ; Z_{2j_{\text{вп}}} = N_{2j_{\text{вп}}} \sin \alpha ; T_{2j_{\text{вп}}} = -N_{2j_{\text{вп}}} \cos \alpha .$$

Силы инерции кулисы

Схема сил инерции кулисы представлена на Рис. 6.

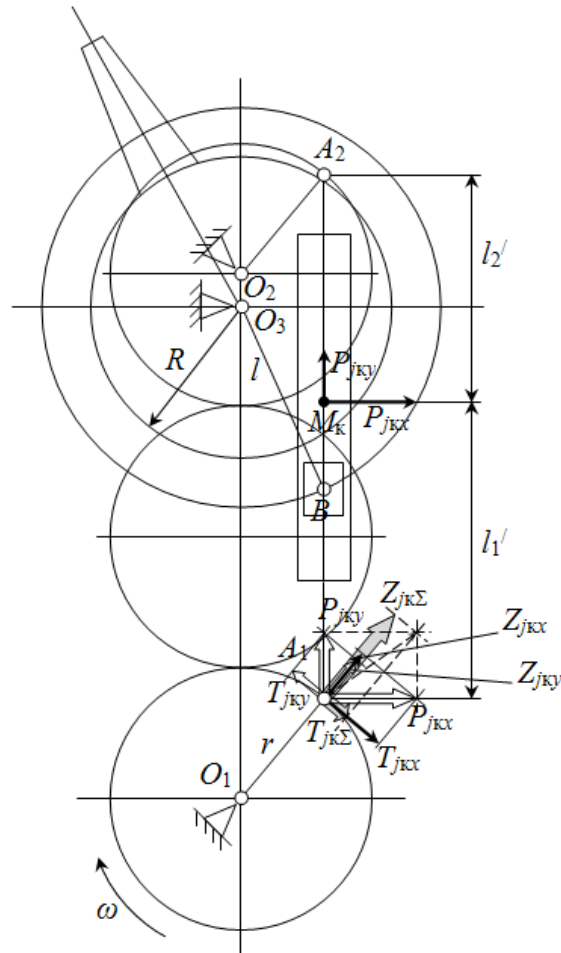


Рисунок 6. Схема сил инерции кулисы.

$$P_{j_{\text{к}x}} = -m_{\text{к}} j_{x_{\text{к}}} = m_{\text{к}} r \omega^2 \sin \alpha ; P_{j_{\text{к}y}} = -m_{\text{к}} j_{y_{\text{к}}} = -m_{\text{к}} r \omega^2 \cos \alpha .$$

В общем случае:

$$P_{1j_{\text{к}x}} = P_{j_{\text{к}x}} \frac{l_2'}{4r} ; P_{2j_{\text{к}x}} = P_{j_{\text{к}x}} \frac{l_1'}{4r} .$$

Для симметричной (равноплечей) кулисы:

$$P_{1j_{\text{к}x}} = P_{2j_{\text{к}x}} = \frac{P_{j_{\text{к}x}}}{2} ; P_{1j_{\text{к}y}} = P_{2j_{\text{к}y}} = \frac{P_{j_{\text{к}y}}}{2} .$$

$$Z_{j_{\text{к}x}} = P_{j_{\text{к}x}} \sin \alpha ; T_{j_{\text{к}x}} = P_{j_{\text{к}x}} \cos \alpha ; Z_{j_{\text{к}y}} = P_{j_{\text{к}y}} \cos \alpha ; T_{j_{\text{к}y}} = P_{j_{\text{к}y}} \sin \alpha .$$

$$Z_{j_{\text{к}\Sigma}} = Z_{j_{\text{к}x}} + Z_{j_{\text{к}y}} = P_{j_{\text{к}x}} \sin \alpha + P_{j_{\text{к}y}} \cos \alpha$$

$$T_{j_{\text{к}\Sigma}} = T_{j_{\text{к}x}} + T_{j_{\text{к}y}} = P_{j_{\text{к}x}} \cos \alpha + P_{j_{\text{к}y}} \sin \alpha$$

Аналогично:

– в общем случае

$$\begin{aligned}
 Z_{1jk_x} &= P_{1jk_x} \sin \alpha ; T_{1jk_x} = P_{1jk_x} \cos \alpha ; Z_{1jk_y} = P_{1jk_y} \cos \alpha ; T_{1jk_y} = P_{1jk_y} \sin \alpha . \\
 Z_{1jk_\Sigma} &= Z_{1jk_x} + Z_{1jk_y} = P_{1jk_x} \sin \alpha + P_{1jk_y} \cos \alpha \\
 T_{1jk_\Sigma} &= T_{1jk_x} + T_{1jk_y} = P_{1jk_x} \cos \alpha + P_{1jk_y} \sin \alpha \\
 Z_{2jk_x} &= P_{2jk_x} \sin \alpha ; T_{2jk_x} = P_{2jk_x} \cos \alpha ; Z_{2jk_y} = P_{2jk_y} \cos \alpha ; T_{2jk_y} = P_{2jk_y} \sin \alpha . \\
 Z_{2jk_\Sigma} &= Z_{2jk_x} + Z_{2jk_y} = P_{2jk_x} \sin \alpha + P_{2jk_y} \cos \alpha \\
 T_{2jk_\Sigma} &= T_{2jk_x} + T_{2jk_y} = P_{2jk_x} \cos \alpha + P_{2jk_y} \sin \alpha
 \end{aligned}$$

– для симметричной кулисы

$$\begin{aligned}
 Z_{1,2jk_x} &= \frac{Z_{jk_x}}{2} = \frac{1}{2} P_{jk_x} \sin \alpha ; T_{1,2jk_x} = \frac{T_{jk_x}}{2} = \frac{1}{2} P_{jk_x} \cos \alpha \\
 Z_{1,2jk_y} &= \frac{Z_{jk_y}}{2} = \frac{1}{2} P_{jk_y} \cos \alpha ; T_{1,2jk_y} = \frac{T_{jk_y}}{2} = \frac{1}{2} P_{jk_y} \sin \alpha \\
 Z_{1,2jk_\Sigma} &= Z_{1,2jk_x} + Z_{1,2jk_y} = \frac{1}{2} P_{jk_x} \sin \alpha + \frac{1}{2} P_{jk_y} \cos \alpha = \frac{1}{2} (P_{jk_x} \sin \alpha + P_{jk_y} \cos \alpha) \\
 T_{1,2jk_\Sigma} &= T_{1,2jk_x} + T_{1,2jk_y} = \frac{1}{2} P_{jk_x} \cos \alpha + \frac{1}{2} P_{jk_y} \sin \alpha = \frac{1}{2} (P_{jk_x} \cos \alpha + P_{jk_y} \sin \alpha) .
 \end{aligned}$$

Суммарные силы

Схема суммарных сил представлена на Рис. 7.

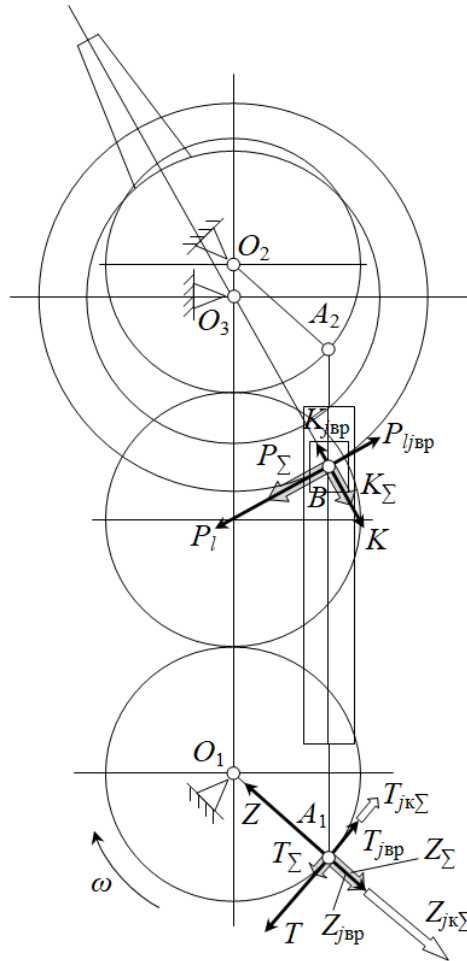


Рисунок 7. Схема суммарных сил.

Суммарная общая тангенциальная сила (на ведущем кривошипе):

$$T_{\Sigma} = T + T_{j_{вр}} + T_{jk_{\Sigma}} ,$$

где $T_{jk_{\Sigma}} = T_{jk_x} + T_{jk_y}$.

Суммарная общая сила, действующая по оси ведущего кривошипа:

$$Z_{\Sigma} = Z + Z_{j_{вр}} + Z_{jk_{\Sigma}} ,$$

где $Z_{jk_{\Sigma}} = Z_{jk_x} + Z_{jk_y}$.

Суммарная общая сила, действующая по оси хвостовика:

$$K_{\Sigma} = K + K_{j_{вр}} .$$

Суммарная общая сила, действующая тангенциально хвостовику:

$$P_{\Sigma} = P_l + P_{l_{вр}} ,$$

где $P_{l_{вр}} = P_{j_c} + P_{j_x}$.

Аналогично:

$$T_{1\Sigma} = T_1 + T_{1j_{вр}} + T_{1jk_{\Sigma}} ; Z_{1\Sigma} = Z_1 + Z_{1j_{вр}} + Z_{1jk_{\Sigma}} ; T_{2\Sigma} = T_2 + T_{2j_{вр}} + T_{2jk_{\Sigma}} ; Z_{2\Sigma} = Z_2 + Z_{2j_{вр}} + Z_{2jk_{\Sigma}} ,$$

где $T_{1jk_{\Sigma}} = T_{1jk_x} + T_{1jk_y}$; $Z_{1jk_{\Sigma}} = Z_{1jk_x} + Z_{1jk_y}$; $T_{2jk_{\Sigma}} = T_{2jk_x} + T_{2jk_y}$; $Z_{2jk_{\Sigma}} = Z_{2jk_x} + Z_{2jk_y}$.

Центробежные силы инерции

Центробежные силы инерции (сердечника, если он не осесимметричен, хвостика и кривошипов) не влияют на тангенциальные составляющие других сил (так как действуют вдоль осей симметрии, направлены по радиусам, и линии их действия пересекают оси вращения соответствующих деталей), но растягивают соответствующие детали и нагружают их опоры.

Центробежные силы инерции отражаются на схеме, нагружающих опоры.

Схема центробежных сил инерции представлена на Рис. 8.

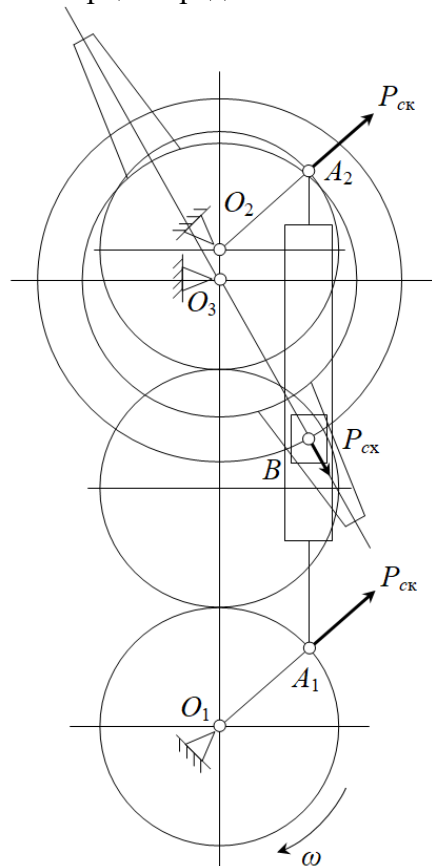


Рисунок 8. Схема центробежных сил инерции.

$$P_{c_x} = m_x l \omega_c^2 ; P_{c_k} = m_k r \omega^2 .$$

Параметризация механизма

Процесс параметризации иллюстрируется Рис. 9.

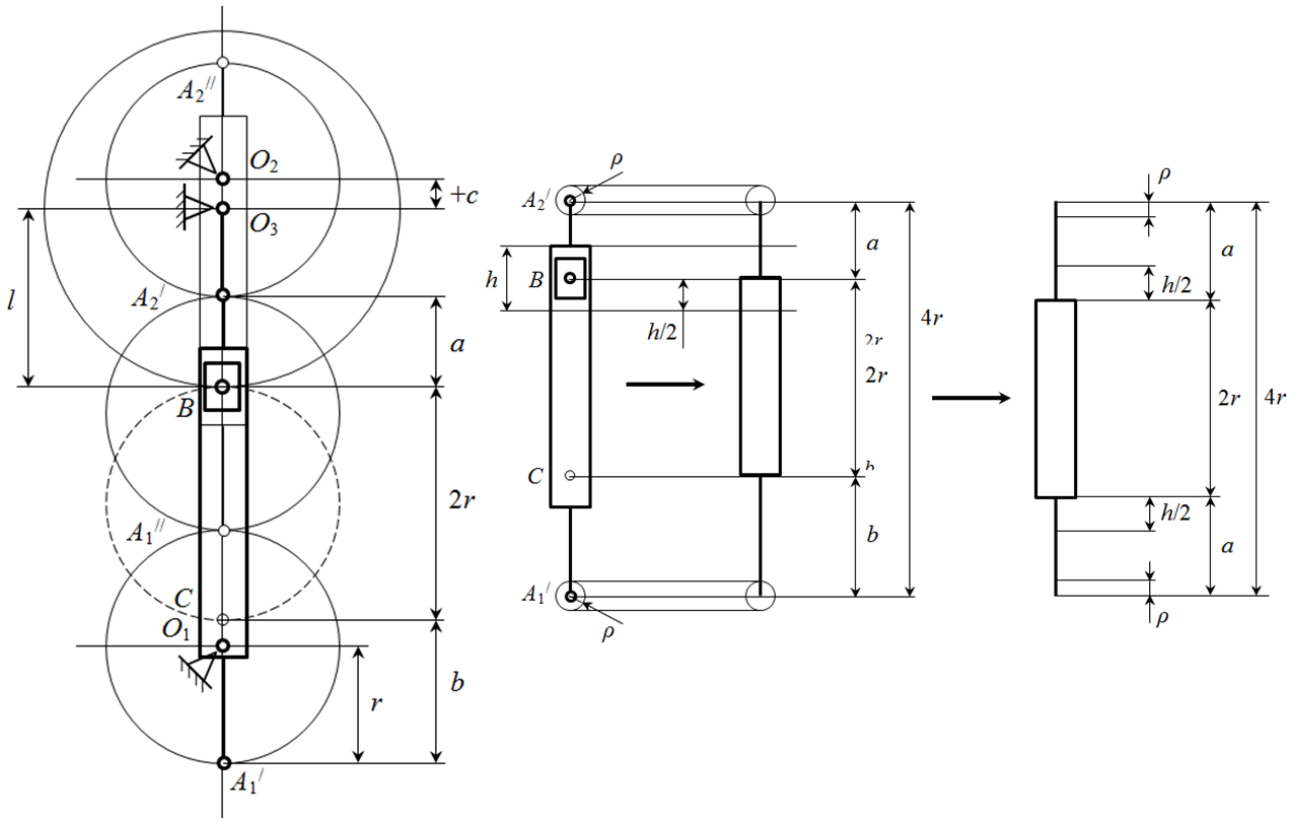


Рисунок 9. К определению параметризации.

Из схемы, приведенной на Рис. 9 следует, что

$$a + b = 2r ,$$

С учетом этого можно получить:

$$c = r - l + a = 3r - l - b .$$

Для симметричной (равноплечей) кулисы выполняется условие:

$$a = b .$$

С конструктивной точки зрения c должно быть таким, чтобы паз кулисы располагался симметрично относительно ее шарниров – то есть, чтобы выполнялось условие симметричности (равноплечности) кулисы.

Тогда расчетная формула для определения смещения оси сердечника относительно оси верхнего кривошипа будет иметь вид:

$$c = r \left(2 - \frac{1}{\lambda} \right) .$$

Таким образом:

– при $\lambda > 0,5$ ($r > 0,5l$) для обеспечения выполнения условия равенства плеч кулисы ($a = b$) ось сердечника должна быть смещена вниз (в сторону нижнего кривошипа) относительно оси верхнего кривошипа, и это смещение положительно;

– при $\lambda < 0,5$ ($r < 0,5l$) для обеспечения выполнения условия равенства плеч кулисы ($a = b$) ось сердечника должна быть смещена вверх относительно оси верхнего кривошипа, и это смещение отрицательно.

Величина смещения оси сердечника относительно оси верхнего кривошипа участвует в определении сил, передаваемых на кулису от ползуна.

Исходные данные для динамического расчета

Исходными данными для динамического анализа и расчета механизма ЛДВС с ККППМ служат:

– p и p' ;

– γ_{\max} , r , λ , c , n , R , H , B , δ , i , m_c , m_x , m_k , $m_{кр}$, l_1' , l_2' **.

Для симметричной кулисы (когда $a = b$) при заданном r величина c рассчитывается как $f(\lambda)$ и не задается в исходных данных.

У симметричной кулисы $l_1' = l_2' = 2r$.

γ_{\max} и λ связаны ([2]), поэтому можно задаваться либо тем (например, γ_{\max}), либо другим (λ) и вычислять вторую величину по соответствующей формуле.

С точки зрения организации рабочего цикла целесообразнее сначала найти γ_{\max} , необходимый для получения требуемой мощности двигателя при определенной геометрии рабочей камеры, а затем задавать этот γ_{\max} при проведении динамических расчетов и вычислять λ как его (этого γ_{\max}) функцию.

R , H , B удобно выбирать, исходя из рабочего объема, характерного для поршневых двигателей соответствующих класса (размерности) и числа цилиндров, с учетом рационального соотношения этих размеров.

При определении V_h величины R , H , B измеряются в см, при расчете P_T – в м.

Динамический расчет ЛДВС

Ниже приведены основные исходные данные (Табл. 2) и отдельные графики (Рис. 10) к динамическому расчету однолопастного четырехтактного ЛДВС на основе ККППМ с двумя кривошипами простого (рабочий цикл осуществляется с одной стороны лопасти) – 1-4-1 – и двойного (рабочий цикл осуществляется с обеих сторон лопасти) – 1-4-2 – действия.

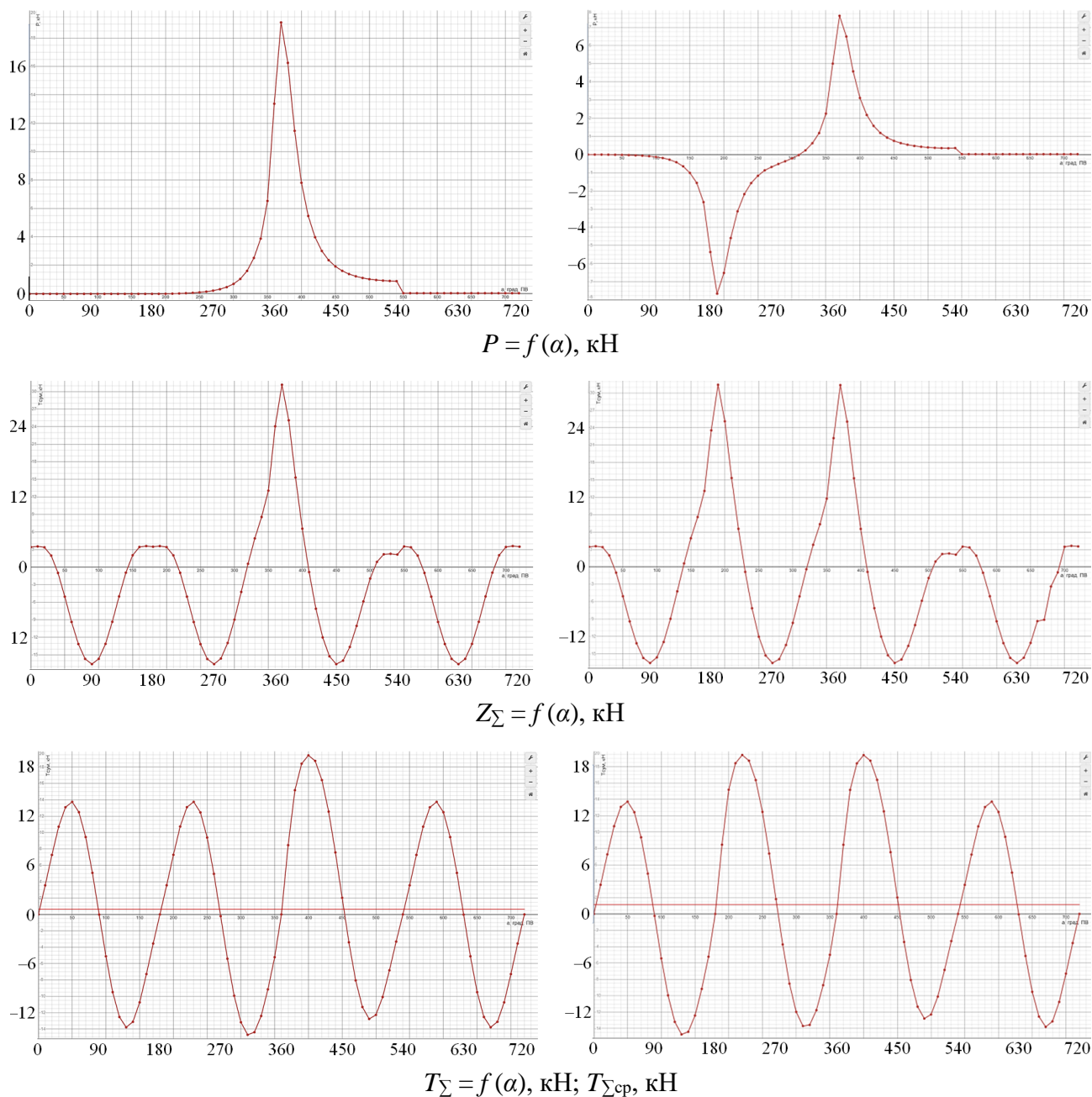
Таблица 2. Основные исходные данные для динамического расчета.

№ п/п	Параметр		Ед. изм.	Значение
1	1-4-1	$p' = p_0$	МПа	0,1013
	1-4-2	$p' = p$ со сдвигом фазы*		
2	γ_{\max}		° (град)	90
3	r		м	0,05
4	λ			0,707
5	c		м	0,0293
6	R		см	5
7	H		см	5
8	B		см	5
9	δ		°	0
10	i			1
11	n		мин ⁻¹	5500
12	m_c		кг	1,5
13	$q_c = 0,6R$		м	0,03
14	m_x (с ползуном)		кг	0,5
15	$q_x = 0,5l$		м	0,035
16	m_k		кг	1
17	$m_{кр}$		кг	0,75

1-4-1 – 1 лопасть, 4 такта, простое (одинарное) действие;

1-4-2 – 1 лопасть, 4 такта, двойное действие;

* давление с правой (рис. 1) стороны лопасти «отстает» от такого с левой стороны лопасти на 180 град. ПВ



1-4-1

1-4-2

Рисунок 10. Графики к динамическому расчету.

Заключение

В настоящей работе представлена первая часть материалов, относящихся к разделу динамики двигателей внутреннего сгорания вообще и ЛДВС в частности, рассмотрены силы, действующие в двигателе.

Моменты сил, анализ уравновешенности и уравновешивание, а также вопросы обеспечения равномерности хода и определение маховой массы ЛДВС на основе ККППМ (как с двумя кривошипами, так и с двумя сердечниками) будут являться предметом дальнейших исследований.

Изложенный материал показывает, что динамика ЛДВС с ККППМ применительно к силам, действующим в двигателе, более сложна в графо-аналитическом и расчетном отношении,

чем таковая для кривошипно-шатунных ДВС ([3] и др. подобные), что является следствием большей сложности кинематической схемы ЛДВС на основе ККППМ по сравнению с кинематической схемой ДВС с КШМ (за исключением кривошипно-кулисно-рычажных и других сложных конструкций кривошипно-шатунных двигателей, в том числе, обеспечивающих управляемое движение поршней и (или) переменную степень сжатия ([4–7])).

Вместе с тем, повышенная трудоемкость динамического анализа кривошипно-кулисных преобразующих механизмов лопастных двигателей внутреннего сгорания не может служить препятствием к их всестороннему исследованию, имеющему конечной целью реализацию на практике определенных преимуществ таких двигателей как относительно наиболее распространенных на сегодняшний день кривошипно-шатунных ДВС, так и перед некоторыми типами предложенных ([8, 9]) и разрабатываемых тепловых двигателей оригинальных схем ([10, 11]).

Литература:

1. 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; опублик. 31.08.2022. Бюл. № 25.
2. Клементьев В.В. Кинематика кривошипно-кулисного параллелограммного преобразующего механизма лопастного двигателя внутреннего сгорания / Вестник УГАТУ. 2023. Т. 27, № 2 (100). С. 24–41.
3. 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.
4. 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.
5. Тер-Мкртчян Г. Г. Управление движением поршней в двигателях внутреннего сгорания [монография] / Г. Г. Тер-Мкртчян. Москва: Металлургиздат, 2011. 301 с.
6. Баландин С. С. Бесшатунные поршневые двигатели внутреннего сгорания. М.: Машиностроение, 1972. 176 с.
7. Маслов А. П., Рождественский Ю. В., Задорожная Е. А., Левцов М.В. Анализ кинематической схемы поршневого W-образного двигателя с прицепными шатунами / Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2023. Т. 23, № 2. С. 17–30.
8. Чириков К. Ю. Необычные двигатели. М.: Изд-во «Знание», 1976. 64 с.
9. 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.
10. АНО «КБ Зверева «Русский мотор» (Электронный ресурс). URL: <https://kbrusmotor.ru/> (дата обращения 09.08.2024).
11. Duke Engines Pure Power (Электронный ресурс). URL: <https://www.dukeengines.com/> (дата обращения 09.08.2024).

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; klementev-vadim@yandex.ru.

Metadata:

Title: Study of the dynamics of a crank-link parallelogram converting mechanism with two cranks of a vane engine in application to acting forces.

Author: Vadim Veniaminovich Klementev, Associate Professor, Dept. of Internal Combustion Engines. Dipl. Engineer (Chelyabinsk State Tech. Univ., 1996). Cand. of Tech. Sci. (SUSU, 2002).

Abstract: The article presents a section of the dynamics of internal combustion engines related to an engine of a new design (new type) – a vane ICE (VICE) based on a crank-link parallelogram conversion mechanism (CLPCM) with two cranks – in terms of the forces acting in the engine. The definition of the acting forces is considered, the dependencies obtained during dynamic modeling are given, the graphs of the dynamic parameters are shown, and some parametric features of the studied VICE scheme with CLPCM are reflected.

Keywords: vane internal combustion engine, crank-rocker converting mechanism, dynamics.