

## АНАЛИЗ УРАВНОВЕШЕННОСТИ ДЕСЯТИЦИЛИНДРОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Е.А. Григорьев, д.т.н., проф.  
Волгоградский государственный технический университет

Рассматривается уравновешенность десятицилиндровых V-образных двигателей. Сложность задачи связана с большим количеством возможных вариантов углов развала цилиндров и угловых расположений кривошипов коленчатых валов.

Задача решается на основе обобщенных схем КШМ. В результате ее решения получены выражения для неуравновешенных моментов сил инерции вращающихся и поступательно движущихся масс, действующих в продольных вертикальной и горизонтальной плоскостях, которые могут использоваться при расчете уравновешивания и колебаний двигателя. Предложенный метод может эффективно использоваться при расчете уравновешенности двигателей с другими схемами КШМ.

Существует большое количество двигателей, различающихся числом и расположением цилиндров и кривошипов. Вместе с тем пока не имеют распространения десятицилиндровые двигатели, уравновешенность которых недостаточно изучена. Это связано со сложностью расчетной схемы и большим количеством возможных вариантов. Рассмотрение наиболее актуальных из них целесообразно выполнять, исходя из обобщенной V-образной схемы кривошипно-шатунного механизма (КШМ). Применительно к десятицилиндровому двигателю она представляет собой два одинаковых, расположенных под углом, пятицилиндровых двигателя с общим коленчатым валом. Исходная оценка их уравновешенности может при этом осуществляться по уравновешенности пятицилиндровых двигателей. Заметим, что дальше речь будет идти о четырехтактных двигателях.

Анализ показывает, что для пятицилиндрового двигателя возможны двадцать четыре варианта относительного расположения кривошипов и, соответственно, порядков чередования рабочих ходов. Десятицилиндровый V-образный двигатель при каждом варианте расположения кривошипов коленчатого вала имеет шестнадцать вариантов порядка чередования работы цилиндров, и, следовательно, общее их число составляет 384.



Формулы для определения неуравновешенных сил и моментов многоцилиндрового двигателя получаем, исходя из расчетной схемы осевого КШМ и обозначений, приведенных на рис. 1. Наклон цилиндров задается относительно вертикальной продольной плоскости углами  $\varepsilon_i$ , где  $i$  — порядковый номер цилиндра. При отсчете по часовой стрелке принят положительный знак. Положение цилиндров в продольном направлении определяется координатой  $y_{ii}$ , отсчитываемой от оси первого цилиндра. Расстояние между серединами первого кривошипа и кривошипного механизма, задается координатой  $l$ , а между

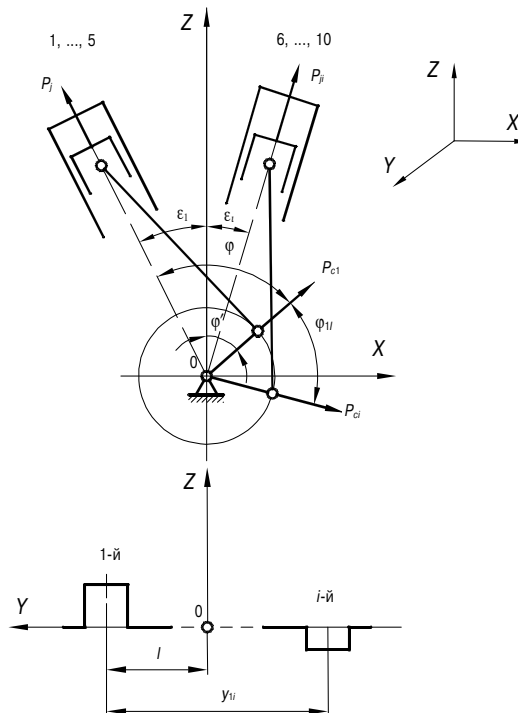


Рис. 1. Схема кривошипно-шатунного механизма десятицилиндрового двигателя

соседними кривошипами —  $a$ . Угол между кривошипами  $i$ -го и первого цилиндров определяется величиной  $\varphi_{1i}$ . Таким образом, можно задать любые варианты схемы КШМ двигателя и аналитически определить для них неуравновешенные силы и моменты.

Угловое перемещение  $I$ -го кривошипа от вертикали (см. рис. 1)

$$\varphi_i = \varphi + \varphi_{1i} + \varepsilon_1 \text{ или } \varphi_i = \varphi' + \varphi_{1i},$$

где  $\varphi$  и  $\varphi'$  — углы поворота первого кривошипа относительно осей первого цилиндра и вертикальной соответственно.

Двигатели, валы которых имеют пять равномерно расположенных по окружности кривошипов, по силам инерции вращающихся и поступательно движущихся масс, как показывают расчеты, являются уравновешенными. Поэтому будем рассматривать только уравновешенность по моментам от сил инерции. Вывод расчетных формул, необходимых для этой цели, приведен в [1]. Используя их, проанализируем уравновешенность интересующих нас вариантов КШМ десятицилиндровых V-образных двигателей. В связи с большим их количеством воспользуемся (в качестве предварительных) данными по уравновешенности пятицилиндровых двигателей, которые имеют двадцать четыре варианта порядков работы цилиндров и соответствующих им угловых расположений кривошипов. Все эти варианты разделим на три группы. К первой отнесем схемы КШМ, имеющих минимальные значения амплитуд моментов сил инерции вращающихся и поступательно движущихся масс первого порядка, ко второй — моменты сил инерции поступательно движущихся масс второго порядка с минимальными значениями амплитуд, а к третьей — все остальные.

В таблице приведены значения амплитуд безразмерных моментов для первой и второй групп,

Группа	Порядок работы цилиндров	Амплитуды безразмерных моментов		
		$\frac{M_c^A}{m_n r \omega^2 a}$	$\frac{M_{j1}^A}{m_n r \omega^2 a}$	$\frac{M_{j2}^A}{m_n r \omega^2 a}$
1 а)	1-2-4-5-3	0,449	0,449	4,980λ
1 б)	1-3-5-4-2			
2 а)	1-4-3-2-5	4,980	4,980	0,449λ
2 б)	1-5-2-3-4			

полученных расчетом, и соответствующих им порядков работы пятицилиндровых двигателей. Для рассматриваемых КШМ однорядных двигателей существуют однозначные связи между порядком работы цилиндров и угловым расположением кривошипов.

Из первой группы для анализа примем вариант КШМ с порядком работы цилиндров 1-3-5-4-2 (рис. 2), а из второй — 1-4-3-2-5 (рис. 3).

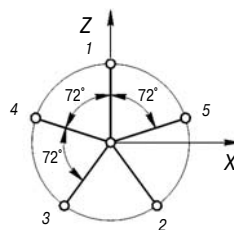


Рис. 2. Угловое расположение кривошипов при порядке работы 1-3-5-4-2

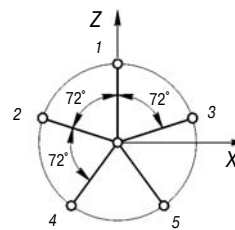


Рис. 3. Угловое расположение кривошипов при порядке работы 1-4-3-2-5

Как следует из анализа данных таблицы амплитуды моментов первого порядка в первой группе в 11,1 раза меньше, чем во второй. Амплитуды моментов второго порядка во второй группе в 11,1 раза меньше, чем в первой.

Принятые варианты углов расположения кривошипов для полноты картины рассмотрим в совокупности с разными углами развала цилиндров, которых в принципе может быть бесчисленное множество. Но нас, в первую очередь, интересуют углы развала цилиндров 90 и 72°. В первом случае имеет место независимость результирующего значения момента сил инерции поступательно движущихся масс первого порядка от угла поворота коленчатого вала, что упрощает его уравновешивание. Во втором — получается равномерное чередование работы цилиндров и, следовательно, большая равномерность крутящего момента. Таким образом, задача сводится к рассмотрению уравновешенности четырех вариантов параметров КШМ. Для этих вариантов линейные параметры коленчатого вала будут следующими:

$$l = 2a, y_{11} = y_{16} = 0;$$

$$y_{12} = y_{17} = a; y_{13} = y_{18} = 2a;$$

$$y_{14} = y_{19} = 3a; y_{15} = y_{1,10} = 4a.$$

Выражения моментов первого порядка получаем, приняв  $k = 1$ , а второго —  $k = 2$ .

**Первый вариант** десятицилиндрового двигателя получен на основе первой группы пятицилиндровых и угле развала  $\gamma = 90^\circ$ . Он имеет порядок работы цилиндров: 1-6-3-8-5-10-4-9-2-7 и следующее угловое расположение кривошипов:  $\varphi_{11} = \varphi_{16} = 0$ ;  $\varphi_{12} = \varphi_{17} = 144^\circ$ ;  $\varphi_{13} = \varphi_{18} = 216^\circ$ ;  $\varphi_{14} = \varphi_{19} = 288^\circ$ ;  $\varphi_{15} = \varphi_{1,10} = 72^\circ$ . При этом будет неравномерное чередование работы цилиндров (через 90 и 54°). Выражения для неуравновешенных моментов имеют вид:

$$M_{cb} = m_r r \omega^2 a (-0,1342 \cos \varphi + 0,8867 \sin \varphi);$$

$$M_{cr} = m_r r \omega^2 a (-0,8867 \cos \varphi - 0,1342 \sin \varphi);$$

$$M_{j1a} = m_n r \omega^2 a (-0,06717 \cos \varphi + 0,4437 \sin \varphi);$$

$$M_{j1r} = m_n r \omega^2 a (-0,4437 \cos \varphi - 0,06717 \sin \varphi);$$

$$M_{j2B} = 0;$$

$$M_{j2r} = m_{\pi} r \omega^2 a \lambda (-6,6956 \cos 2\varphi - 2,1799 \sin 2\varphi).$$

**Второй вариант** десятицилиндрового двигателя получен при таких же параметрах КШМ, что и у первого за исключением угла развала цилиндров  $\gamma$ , который здесь равен  $72^\circ$ .

Выражения для неуравновешенных моментов получаются следующими:

$$M_{св} = m_r r \omega^2 a (-0,006058 \cos \varphi + 0,8968 \sin \varphi);$$

$$M_{сг} = m_r r \omega^2 a (-0,8968 \cos \varphi + 0,006058 \sin \varphi);$$

$$M_{j1B} = m_{\pi} r \omega^2 a (0,003967 \cos \varphi + 0,5872 \sin \varphi);$$

$$M_{j1r} = m_{\pi} r \omega^2 a (0,003977 \cos \varphi + 0,002091 \sin \varphi);$$

$$M_{j2B} = m_{\pi} r \omega^2 a \lambda (-0,001886 \cos 2\varphi + 2,496 \sin 2\varphi);$$

$$M_{j2r} = m_{\pi} r \omega^2 a \lambda (-0,001879 \cos 2\varphi - 0,004191 \sin 2\varphi).$$

**Третий вариант** десятицилиндрового двигателя получен на основе второй группы пятицилиндровых при угле развала цилиндров  $\gamma = 90^\circ$ . Порядок работы цилиндров 1-6-4-9-3-8-2-7-5-10 и следующее угловое расположение кривошипов:  $\varphi_{11} = \varphi_{16} = 0$ ;  $\varphi_{12} = \varphi_{17} = 288^\circ$ ;  $\varphi_{13} = \varphi_{18} = 72^\circ$ ;  $\varphi_{14} = \varphi_{19} = 216^\circ$ ;  $\varphi_{15} = \varphi_{1,10} = 144^\circ$ .

Чередование работы цилиндров здесь будет, как и у первого варианта, неравномерным.

Выражения неуравновешенных моментов имеют следующий вид

$$M_{св} = m_r r \omega^2 a (4,5149 \cos \varphi + 8,8745 \sin \varphi);$$

$$M_{сг} = m_r r \omega^2 a (-8,8745 \cos \varphi + 4,5149 \sin \varphi);$$

$$M_{j1B} = m_{\pi} r \omega^2 a (2,2592 \cos \varphi + 4,4408 \sin \varphi);$$

$$M_{j1r} = m_{\pi} r \omega^2 a (-4,4337 \cos \varphi + 2,2557 \sin \varphi);$$

$$M_{j2B} = 0;$$

$$M_{j2r} = m_{\pi} r \omega^2 a \lambda (-0,37 \cos 2\varphi + 0,524 \sin 2\varphi).$$

**Четвертый вариант** десятицилиндрового двигателя отличается от третьего только значением угла развала цилиндров, который здесь равен, как и у второго,  $\gamma = 72^\circ$ . В результате расчета получены следующие значения неуравновешенных моментов:

$$M_{св} = m_r r \omega^2 a (5,847 \cos \varphi + 8,0594 \sin \varphi);$$

$$M_{сг} = m_r r \omega^2 a (-8,0594 \cos \varphi + 5,847 \sin \varphi);$$

$$M_{j1B} = m_{\pi} r \omega^2 a (2,2592 \cos \varphi + 4,441 \sin \varphi);$$

$$M_{j1r} = m_{\pi} r \omega^2 a (-4,434 \cos \varphi + 2,256 \sin \varphi);$$

$$M_{j2B} = m_{\pi} r \omega^2 a \lambda (0,0004 \cos 2\varphi + 0,00533 \sin 2\varphi);$$

$$M_{j2r} = m_{\pi} r \omega^2 a \lambda (-0,370 \cos 2\varphi + 0,5236 \sin 2\varphi).$$

Анализ показывает, что при угле развала цилиндров  $\gamma = 90^\circ$  в первом и третьем вариантах результирующие значения моментов сил инерции вращающихся и поступательно движущихся масс первого порядка не зависят от угла поворота коленчатого вала. Моменты сил инерции поступательно движущихся масс второго порядка действуют только в горизонтальной плоскости. Практически только в горизонтальной плоскости действует и момент сил инерции поступательно движущихся масс второго порядка и при угле развала цилиндров  $72^\circ$  в четвертом варианте, хотя при таком же угле развала во втором варианте он действует только в вертикальной плоскости.

Моменты сил инерции вращающихся масс КШМ для первого и второго вариантов имеют одинаковые амплитудные значения. Для третьего и четвертого вариантов они также одинаковы.

Для второй группы расположений кривошипов при угле развала цилиндров  $\gamma = 90^\circ$  амплитудные значения моментов центробежных сил инерции вращающихся и поступательно движущихся масс первого порядка в 11,1 раза больше, чем для первой.

Амплитудное значение момента сил инерции поступательно движущихся масс второго порядка для первой группы расположений кривошипов в 11,1 раза больше, чем для второй.

Полученные для принятых вариантов КШМ десятицилиндрового двигателя выражения моментов сил инерции вращающихся и поступательно движущихся масс могут использоваться при расчете его колебаний. Они также являются основой для определения параметров уравновешивающего механизма и разработки его схемы.

#### Литература

1. Григорьев Е.А. Периодические и случайные силы, действующие в поршневом двигателе. — М.: Машиностроение, 2002. — 269 с.
2. Вырубов Д.Н., Ефимов С.И., Иващенко Н.А. и др. Двигатели внутреннего сгорания. Конструирование и расчет на прочность поршневых и комбинированных двигателей / под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. — М.: Машиностроение, 1984. — 383 с.
3. Григорьев Е.А., Васильев А.В., Долгов К.О. Влияние числа и расположения цилиндров и кривошипов на уравновешенность и массогабаритные показатели двигателей // Двигателестроение. — 2004. — № 3. — С. 13–15.