

УРАВНОВЕШИВАНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ ТИПА W8

В.В. Гусаров, к.т.н., проф.
Московский государственный индустриальный университет
Ф.В. Автаев
ЗАО «Вольво-Восток»

Определены углы заклинки кривошипов и смещения шатунных шеек коленчатых валов двигателей типа W8, обеспечивающие равномерное чередование рабочих ходов при различных углах развала цилиндров. Выполнена количественная оценка возмущающего действия неуравновешенных сил инерции от возвратно-поступательно движущихся масс и их моментов для разных вариантов такого двигателя и предложены способы их уравновешивания. По результатам анализа представлены регрессионные модели. Сделан вывод о достаточной уравновешенности таких двигателей при определенных схемах кривошипно-шатунного механизма и способах уравновешивания.

Четырехрядные двигатели внутреннего сгорания (ДВС) типа W8 позволяют обеспечить при том же числе цилиндров и рабочем объеме существенно лучшие массо-габаритные показатели по сравнению с другими конструктивными схемами (R, V, B), обычно применяемыми в автомобилестроении [1].

Для конструктивной схемы W8 характерным является большое разнообразие вариантов кривошипно-шатунного механизма (КШМ), определяемых возможностью реализовывать различные углы развала блока цилиндров γ , осей цилиндров в блоке δ (рис. 1, а), а также применять коленчатые валы с двумя разными схемами заклинки четырех кривошипов, условно называемыми «плоской» (рис. 1, б и в) или «крестообразной» (рис. 1, г и д). Особенностью конструкции коленчатых валов ДВС такого типа являются разрезные шатунные шейки, угол смещения которых ν определяется из условия обеспечения равномерного чередования рабочих ходов. Также из этого условия определяются и углы заклинки кривошипов μ для двух возможных схем коленчатого вала (рис. 1, б и г).

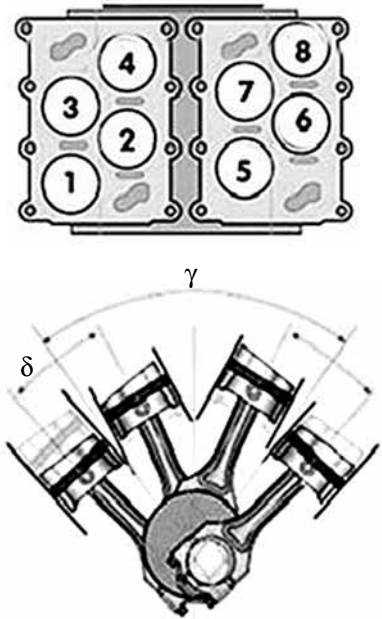
Условия обеспечения равномерного чередования рабочих ходов

Одним из главных источников неуравновешенности ДВС являются возмущения от действия непостоянного по углу поворота коленчатого

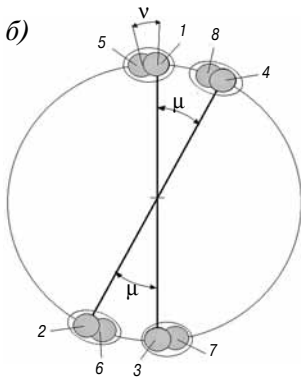


вала результирующего крутящего момента (РКМ). Его минимальное значение обеспечивается при равномерном чередовании рабочих ходов. Анализ показал, что для выполнения этого условия угол смещения соседних шатунных шеек ν должен определяться из условия: $\nu = 90^\circ - \gamma$. Равномерное чередование рабочих ходов для плоской схемы коленчатого вала (рис. 1, б и в) обеспечивается следующим порядком работы цилиндров: 1-5-2-6-4-8-3-7, а для крестообразной схемы (рис. 1, г и д): 1-3-7-2-6-5-4-8. При этом угол заклинки кривошипов μ находится из условия: $\mu = \delta + 2\chi$, где χ — угол, определяемый величиной дезаксажа КШМ (см. рис. 1, а). Особенностью ДВС типа W8 является большой дезаксаж, назначаемый из условий компоновки КШМ. Если в большинстве конструкций автомобильных ДВС величина дезаксажа не превосходит 3 мм (и его обычно не учитывают при кинематическом анализе $\chi \approx 0^\circ$), то у двигателей типа W8 он по технологическим причинам обычно значительно больше, причем дезаксаж «внутренних» и «наружных» блоков цилиндров противоположен по направлению. Пример такого типа ДВС — двигатель «Фольксваген Пассат W8», у которого углы развалов рядов цилиндров: $\gamma = 72^\circ$, $\delta = 15^\circ$; дезаксаж равен 12,5 мм (в этом случае $\chi = 3,4^\circ$); значение угла заклинки кривошипов $\mu = 21,8^\circ$; угол смещения соседних шатунных шеек $\nu = 18^\circ$. Коленчатый вал этого ДВС выполнен по схеме, показанной на рис. 1, б, в. Равномерное чередование рабочих ходов [1] для схемы плоского вала обеспечивается при порядке работы 1-5-2-6-4-8-3-7.

a)



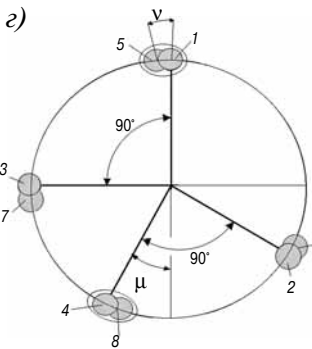
б)



в)



г)



д)



Рис. 1. Схемы кривошипно-шатунного механизма двигателей типа W8:

a — расположение цилиндров; б — схема плоского вала; в — 3D-модель плоского вала; г — схема крестообразного вала; д — 3D-модель крестообразного вала

Необходимые для обеспечения равномерного чередования рабочих ходов параметры КШМ для иных задаваемых схем коленчатого вала, углов развала цилиндров и дезаксажа можно найти аналогичным способом.

Анализ уравновешенности ДВС типа W8

Уравновешенность ДВС типа W8 определяется в том числе возмущениями от действия сил

инерции возвратно-поступательно движущихся масс (ВПДМ) и моментов этих сил. КШМ ДВС типа W8 имеют повышенную сложность и многовариантность в сравнении с традиционными. Анализ уравновешенности таких схем в известной технической литературе отсутствует. Специалисты ФБГОУ МГИУ разработали методики и программы анализа различных возмущений в поршневых ДВС (включая и от действия РКМ), позволяющие выполнять их сравнительную количественную оценку, исследовать разные способы уравновешивания [2]. Ниже приведены результаты такого анализа для различных вариантов ДВС типа W8: при варьировании углами развала цилиндров в диапазонах $\gamma = 90^\circ \dots 60^\circ$, $\delta = 0^\circ \dots 20^\circ$ для плоской и крестообразной схем заклинки кривошипов коленчатого вала.

В задачи анализа входило определение возмущений от действия сил инерции ВПДМ 1-го и 2-го порядка и моментов этих сил для разных вариантов КШМ исследуемого ДВС и оптимальных способов уравновешивания.

Для оценки безразмерных значений сил инерции ВПДМ принято:

$$M \cdot r \cdot \omega^2 = 1,$$

где M — ВПДМ в одном цилиндре; r — радиус кривошипа; ω — угловая скорость вращения коленчатого вала.

Общий алгоритм анализа возмущений от действия сил инерции ВПДМ и моментов этих сил выполнялся в следующей последовательности:

1. Программным способом находят дискретные безразмерные значения (помечено нижним индексом б.р. в символах параметров формул) проекций результирующих сил инерции ВПДМ 1-го и 2-го порядков на вертикальную (Y): $\Sigma P_{б.р.ф1Y}$, $\Sigma P_{б.р.ф2Y}$ и горизонтальную (X): $\Sigma P_{б.р.ф1X}$, $\Sigma P_{б.р.ф2X}$ оси координат для различных углов поворота коленчатого вала ϕ за период (360° для сил 1-го порядка, 180° для сил инерции 2-го порядка). Расчетная схема показана на рис. 2, а. Эти данные получены для разных вариантов схем КШМ ДВС типа W8.

Аналогичным способом находим безразмерные значения проекций моментов от сил инерции ВПДМ 1-го и 2-го порядков: $\Sigma M_{б.р.ф1X}$, $\Sigma M_{б.р.ф1Y}$, $\Sigma M_{б.р.ф2X}$, $\Sigma M_{б.р.ф2Y}$ для различных схем КШМ. Заметим, что с учетом резонансной зоны колебаний от исследуемых источников возмущений, моменты от сил инерции в этом случае вычислялись относительно центра масс ЦМ силового агрегата (СА), установленного на подвесе, включающего как ДВС, так и другие агрегаты, например коробку передач (КП) (рис. 2, б) [3].

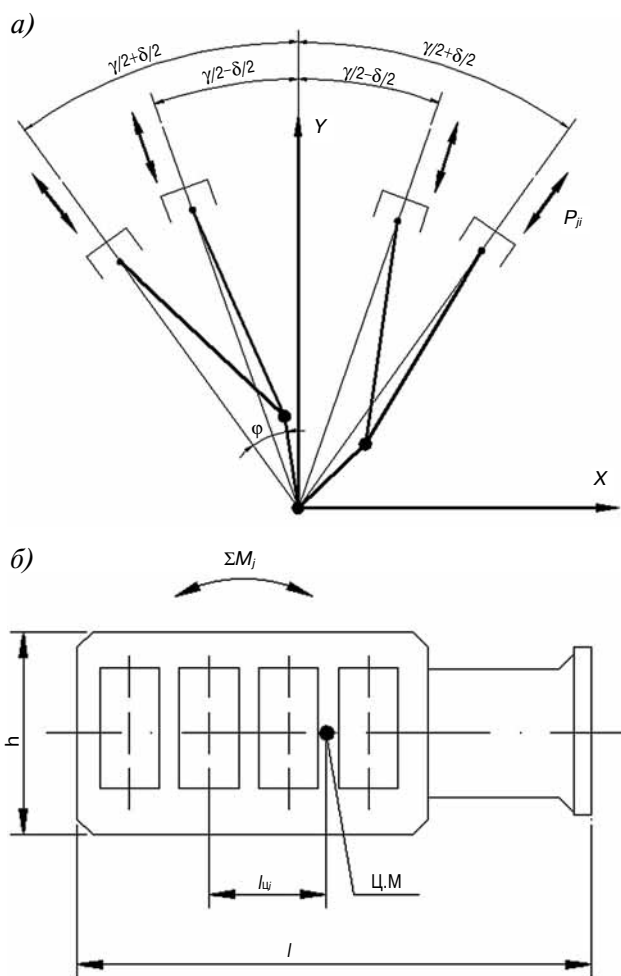


Рис. 2. Расчетные схемы действия сил инерции ВПДМ (а) и моментов от этих сил (б)

2. Выполняется количественная оценка неуравновешенности исследованных вариантов двигателя путем вычисления программным способом безразмерных максимальных за период импульсов возмущений от действия результирующих инерционных сил ВПДМ: $L_{б.р.рj1}$, $L_{б.р.рj2}$ и их моментов: $L_{б.р.мj1}$, $L_{б.р.мj2}$.

3. Для вариантов ДВС типа W8, где не был самоуравновешен момент от сил инерции 1-го порядка ($L_{б.р.мj1} \neq 0$), программным способом исследуется эффективность его частичного «естественного» уравнивания за счет установки специально рассчитанных дисбалансов от вращающихся масс (ВМ) (противовесов на коленчатом вале). Для этого находится оптимальное безразмерное значение модуля уравнивающего центробежного момента $M_{б.р.ц.б.ур}$ от ВМ и угол плоскости его действия $\alpha_{ц.б.ур}$ (относительно плоскости кривошипа 1-го цилиндра), при которых в максимальной степени обеспечивается уравнивание момента $\Sigma M_{б.р.рj1}$. Оптимальные значения $M_{б.р.ц.б.ур}$ и $\alpha_{ц.б.ур}$ соответствуют условию минимума импульса возмущения от совместного

действия момента сил 1-го порядка и центробежного: $L_{б.р.мj1ур} \rightarrow \min$. Подобным способом исследуется и возможность частичного уравнивания силы инерции ВПДМ 1-го порядка; путем нахождения оптимальных значений ВМ и значения импульса возмущения этой силы после частичного уравнивания $L_{б.р.рj1ур}$.

4. Результаты анализа представлялись в виде таблиц значений импульсов возмущений от действия неуравновешенных сил и моментов для разных схем ДВС типа W8, годографов неуравновешенных сил и моментов, а также в виде регрессионных моделей зависимости импульсов возмущений неуравновешенных параметров от углов γ и δ развала цилиндров.

Выражения для безразмерных результирующих проекций сил инерции 1-го и 2-го порядков на оси X и Y имеют вид:

$$\Sigma P_{б.р.ф j1X} = \sum_{i=1}^8 \sin\left(\pm \frac{\gamma}{2} \pm \frac{\delta}{2}\right)_i \cos(\varphi - \theta_{1-i});$$

$$\Sigma P_{б.р.ф j1Y} = \sum_{i=1}^8 \cos\left(\pm \frac{\gamma}{2} \pm \frac{\delta}{2}\right)_i \cos(\varphi - \theta_{1-i});$$

$$\Sigma P_{б.р.ф j2X} = \sum_{i=1}^8 \sin\left(\pm \frac{\gamma}{2} \pm \frac{\delta}{2}\right)_i \lambda \cdot \cos 2(\varphi - \theta_{1-i});$$

$$\Sigma P_{б.р.ф j2Y} = \sum_{i=1}^8 \cos\left(\pm \frac{\gamma}{2} \pm \frac{\delta}{2}\right)_i \lambda \cdot \cos 2(\varphi - \theta_{1-i}),$$

где в нижнем индексе результирующих сил указан угол поворота коленчатого вала относительно 1-го цилиндра и порядок результирующей силы инерции ВПДМ: j_1 — 1-го порядка, j_2 — 2-го порядка; $(\pm \gamma/2 \pm \delta/2)_i$ — угол между вертикальной осью Y и цилиндра с номером i , l — безразмерный кинематический параметр ДВС, θ_{1-i} — интервал между рабочими ходами 1-го и i -го цилиндров (определяемые порядком работы цилиндров).

Проекции безразмерных результирующих моментов от сил инерции ВПДМ на оси координат находятся с учетом положения ЦМ СА:

$$\Sigma M_{б.р.ф j1X} = \sum_{i=1}^8 l_{б.р.i} \times \sin\left(\pm \frac{\gamma}{2} \pm \frac{\delta}{2}\right)_i \cos(\varphi - \theta_{1-i});$$

$$\Sigma M_{б.р.ф j1Y} = \sum_{i=1}^8 l_{б.р.i} \times \cos\left(\pm \frac{\gamma}{2} \pm \frac{\delta}{2}\right)_i \cos(\varphi - \theta_{1-i});$$

$$\Sigma M_{б.р.ф j2X} = \sum_{i=1}^8 l_{б.р.i} \times \sin\left(\pm \frac{\gamma}{2} \pm \frac{\delta}{2}\right)_i \lambda \cdot \cos 2(\varphi - \theta_{1-i});$$

$$\Sigma M_{б.р.ф j2Y} = \sum_{i=1}^8 l_{б.р.i} \times \cos\left(\pm \frac{\gamma}{2} \pm \frac{\delta}{2}\right)_i \lambda \cdot \cos 2(\varphi - \theta_{1-i}),$$

где $l_{б.р.i}$ — безразмерное расстояние от оси цилиндра с номером i до ЦМ: $l_{б.р.i} = l_{ui} / l_u$, l_{ui} — фактическое (размерное значение) расстояния от оси цилиндра с номером i до ЦМ, l_u — расстояние между осями соседних в блоке ДВС цилиндров

(например, между цилиндрами с номерами 1 и 2) (рис. 2, б). Программой предусмотрена возможность варьирования положением ЦМ при анализе значений моментов.

Таким образом вычисляются дискретные безразмерные значения неуравновешенных сил и моментов в ДВС типа W8 с различными углами развала цилиндров и разными схемами коленчатых валов за период их действия с интервалом через 10° поворота коленчатого вала.

Безразмерные максимальные за один оборот коленчатого вала импульсы возмущений от неуравновешенных сил и моментов вычисляются по формулам:

$$L_{б.р.рj1} = \sqrt{L_{б.р.рj}^2 1X^2 + L_{б.р.рj}^2 1Y^2};$$

$$L_{б.р.рj2} = \sqrt{L_{б.р.рj}^2 2X^2 + L_{б.р.рj}^2 2Y^2};$$

$$L_{б.р.мj1} = \sqrt{L_{б.р.мj}^2 1X^2 + L_{б.р.мj}^2 1Y^2};$$

$$L_{б.р.мj2} = \sqrt{L_{б.р.мj}^2 2X^2 + L_{б.р.мj}^2 2Y^2},$$

где подкоренные параметры являются максимальными значениями проекций импульсов соответствующих сил и моментов, вычисленных за период оборота коленчатого вала в функции угла поворота кривошипа (в радианах).

Результаты анализа возмущений от действия ВПДМ для плоской схемы коленчатого вала

Для плоской схемы коленчатого вала ДВС типа W8 при всех исследованных вариантах углов развала цилиндров γ и δ обеспечивается самоуравновешивание от результирующей сил инерции 1-го порядка ΣP_{j1} . Неуравновешенны силы инерции 2-го порядка ΣP_{j2} ($L_{б.р.рj2} \neq 0$), момент от этих сил ΣM_{j2} ($L_{б.р.мj2} \neq 0$), а также момент от сил инерции 1-го порядка ΣM_{j1} ($L_{б.р.мj1} \neq 0$). Действие неуравновешенных сил и моментов можно оценить на примере данных годографов безразмерных векторов для варианта углов развала цилиндров $\gamma = 72^\circ$, $\delta = 15^\circ$, показанных на рис. 3.

Положение ЦМ СА в этом примере принимается в середине длины коленчатого вала (его положение для рассматриваемой схемы коленчатого вала влияет лишь на момент от сил инерции 2-го порядка). Весьма эффективным здесь является частичное уравнивание момента от сил инерции 1-го порядка с помощью противовесов коленчатого вала, создающих центробежный момент $M_{б.р.ц.б.ур}$. (см. п. 4 алгоритма анализа). За счет этого существенно снижается импульс возмущения: $L_{б.р.мj1} / L_{б.р.мj1ур} \approx 6,4$.

Годографы этого момента до и после уравнивания показаны на рис. 3 (соответствуют эллипсу 2 и окружности 3.

Наибольшее возмущение для рассматриваемого варианта ДВС происходит от действия силы инерции 2-го порядка ΣP_{j2} . Для возможности прямого количественного сравнения возмущений от действия сил и моментов необходимо оценивать приведенные значения импульсов сил к моменту (или наоборот) из условий равенства энергий возмущений СА (на подвесе) от действия фактических и приведенных значений [4]. В частности размерный импульс силы инерции ВПДМ $L_{рj}$ соответствует приведенному размерному импульсу от действия условного момента $L_{пр.мj}$ от этой силы, определяемому из выражения: $L_{пр.мj} = L_{рj} \cdot K_{пр}$, где $K_{пр}$ — коэффициент приведения: $K_{пр} = \sqrt{J_{са} / M_{са}}$; $J_{са}$ — момент инерции СА относительно оси, проходящей через ЦМ перпендикулярно плоскости действия момента ΣM_j , $M_{са}$ — масса СА.

Примерное значение момента инерции СА можно найти из выражения: $J_{са} = (M_{са}/12) \times (l^2 + h^2)$, где l и h длина и высота СА (рис. 2, б) [3]. Безразмерные импульсы сравниваемых возмущений для рассматриваемого варианта: $L_{б.р.рj2} = 1,18$ рад, $L_{б.р.мj1ур} = 0,23$ рад. Размерные значения этих импульсов определяются массагабаритными параметрами СА и скоростным режимом работы:

$$L_{рj2} = L_{б.р.рj2} \cdot M \cdot r \cdot \omega, \text{ Нс};$$

$$L_{мj1ур} = L_{б.р.мj1ур} \cdot M \cdot r \cdot \omega \cdot l_{ц}, \text{ Нмс.}$$

Для данных СА «Фольксваген Пассат W8» с учетом коэффициента приведения импульс от действия неуравновешенной силы инерции 2-го порядка вызывает возмущение примерно в 24 раза большее, чем от момента сил инерции 1-го порядка: $(L_{рj2} \cdot K_{пр}) / L_{мj1ур} = 23,6$.

Поэтому в двигателе «Фольксваген Пассат W8» уравнивание силы инерции 2-го порядка выполнено с помощью двух балансирных валов

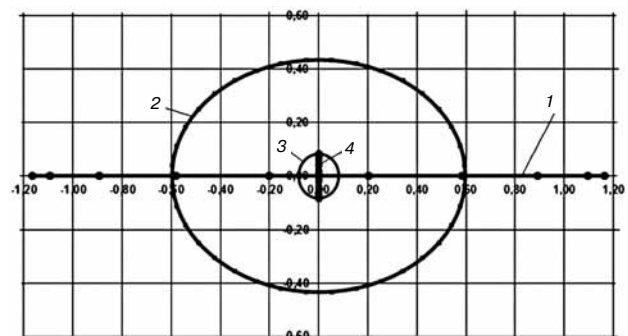


Рис. 3. Годографы безразмерных векторов сил инерции ВПДМ и моментов этих сил в ДВС типа W8 с плоским коленчатым валом при углах развала цилиндров $\gamma = 72^\circ$, $\delta = 15^\circ$:

1 — сила инерции 2-го порядка без уравнивания; 2 — момент силы инерции 1-го порядка без уравнивания; 3 — момент силы инерции 1-го порядка после уравнивания противовесами коленчатого вала; 4 — момент силы инерции 2-го порядка без уравнивания

по методу Ланчестера. Здесь оси двух балансирных валов вращаются с удвоенной, относительно коленчатого вала, угловой скоростью в противоположных направлениях ($\pm 2\omega$), параллельных оси коленчатого вала, так что плоскость, включающая обе оси балансира, вертикальна (рис. 4). При использовании балансирных валов уравновешивается не только сила инерции 2-го порядка ($L_{б.р.р2} = 0$), но и момент от этой силы ($L_{б.р.м2} = 0$). Таким образом, в рассматриваемом варианте ДВС типа W8 с плоским коленчатым валом, неуравновешенным от действия инерционных сил и моментов, остается только небольшая часть момента от сил инерции 1-го порядка, соответствующая величине безразмерного импульса возмущения $L_{б.р.м1ур} = 0,23$ рад.

Расчетные значения импульсов возмущения от действия инерционных сил и моментов для других углов развала цилиндров приведены в табл. 1.

Как видно из приведенных данных, возмущение от неуравновешенного момента ΣM_1 возрастает с увеличением угла развала цилиндров в блоке δ , а эффективность его частичного уравновешивания возрастает при увеличении угла развала блока цилиндров γ , так что при $\gamma = 90^\circ$ возможно полное уравновешивание. В целом характер кривых годографов неуравновешенных сил и моментов для исследованных вариантов подобен показанным на рис. 3. Наибольшее возмущение (следовательно, наибольшая неуравновешенность) во всех вариантах определяется силой инерции 2-го порядка ΣP_2 — эта сила у всех анализируемых вариантов действует только в горизонтальной плоскости — по линии 1 на рис. 3, ее полное уравновешивание для всех вариантов возможно и целесообразно (несмотря на некоторое усложнение их конструкции) с помощью двух балансирных валов как показано на рис. 4.

Значение безразмерного импульса возмущения от действия частично уравновешенного момента сил инерции 1-го порядка $L_{б.р.м1ур}$ для различных

Безразмерные импульсы возмущения (рад) от действия сил инерции ВПДМ 2-го порядка $L_{б.р.р2}$, моментов сил инерции 1-го порядка до и после частичного уравновешивания: $L_{б.р.м1}$, $L_{б.р.м1ур}$

Угол развала цилиндров в блоке δ	Угол развала блока цилиндров γ					
	60°	66°	72°	78°	84°	90°
0°	$L_{б.р.р2} = 1,01$	1,10	1,19	1,27	1,35	1,43
	$L_{б.р.м1} = 0$	0	0	0	0	0
	$L_{б.р.м1ур} = 0$	0	0	0	0	0
10°	1,01	1,10	1,18	1,27	1,35	1,42
	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
	0,26	0,21	0,16	0,10	0,05	0
15°	1,00	1,09	1,18	1,26	1,34	1,42
	1,49	1,49	1,49	1,49	1,49	1,49
	0,39	0,31	0,23	0,16	0,08	0
20°	0,99	1,08	1,17	1,25	1,33	1,41
	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98
	0,54	0,41	0,31	0,21	0,10	0

углов развала цилиндров (задаваемых в градусах) описывается регрессионной моделью, полученной методами матричной алгебры по данным, приведенным в табл. 1:

$$L_{б.р.м1ур} = b_1 + b_2\delta + b_3\gamma + b_4\gamma\delta + b_5\gamma^2, \text{ (рад)},$$

где $b_1 = 5,012 \cdot 10^{-2}$; $b_2 = 7,946 \cdot 10^{-2}$; $b_3 = -1,453 \cdot 10^{-3}$; $b_4 = -8,840 \cdot 10^{-4}$; $b_5 = 9,830 \cdot 10^{-6}$.

Результаты анализа возмущений от действия ВПДМ для крестообразной схемы коленчатого вала

Для крестообразной схемы коленчатого вала во всех исследованных вариантах углов развала цилиндров обеспечивается полное самоуравновешивание сил инерции ВПДМ 2-го порядка ΣP_2 . Неуравновешенны силы инерции 1-го порядка ΣP_1 ($L_{б.р.р1} \neq 0$), момент от этих сил ΣM_1 ($L_{б.р.м1} \neq 0$), а также момент от сил инерции 2-го порядка ΣM_2 ($L_{б.р.м2} \neq 0$). Например, для варианта углов развала цилиндров двигателя «Фольксваген Пассат W8» ($\gamma = 72^\circ$, $\delta = 15^\circ$) годографы результирующей силы инерции 1-го порядка и момента от этой силы имеют вид эллипсов, годограф момента ΣM_2 — вертикальный отрезок. Наибольшая неуравновешенность для такого варианта определяется действием инерционных сил и моментов ВПДМ 1-го порядка. Безразмерные значения импульсов от указанных возмущений: $L_{б.р.р1} = 1,05$ рад, $L_{б.р.м1} = 8,56$ рад. Здесь весьма эффективно применение конструктивно простого способа частичного уравновешивания с помощью только противовесов коленчатого вала (без применения балансирных валов), как для уравновешивания силы инерции ВПДМ 1-го порядка, так и момента от нее. Программным способом

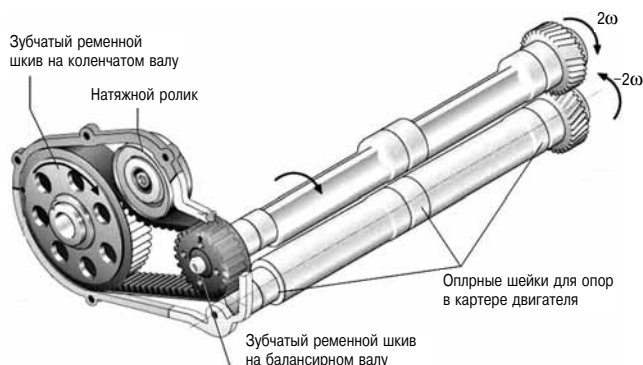


Рис. 4. Балансирные валы для уравновешивания сил инерции ВПДМ 2-го порядка двигателя «Фольксваген Пассат W8»

найлены параметры дисбалансов и расположения ВМ для обеспечения максимально возможного (оптимального) такого способа частичного уравновешивания и дана оценка новым значениям указанных импульсов возмущений: $L_{\delta, p. Pj1y} = 0,16$ рад, $L_{\delta, p. Mj1y} = 1,41$ рад. Импульс возмущения от момента сил ВПДМ 2-го порядка в этом случае невелик: $L_{\delta, p. Mj2} = 0,15$ рад. Общая неуравновешенность от всех указанных возмущений может быть оценена результирующим безразмерным импульсом возмущения от действия условного момента $L_{\delta, p. \Sigma Mj}$, определяющим такую же энергию, как все фактически действующие возмущения. С учетом принятых для примера массогабаритных параметров ДВС значение безразмерного условного результирующего импульса возмущения, приведенного к моменту, можно найти по формуле

$$L_{\delta, p. \Sigma Mj} = \sqrt{(4,7 \cdot L_{\delta, p. Pj1y})^2 + (L_{\delta, p. \Sigma Mj})^2},$$

где $L_{\delta, p. Mj}$ — безразмерный импульс возмущения, определяемый по данным суммарного момента, включающего моменты сил инерций 1-го, 2-го порядков и центробежный уравновешивающий. Для рассматриваемого варианта $L_{\delta, p. Mj} = 1,615$ рад. Как видно, это итоговое возмущение от действия неуравновешенных инерционных сил и моментов существенно больше, чем в ДВС с плоским коленчатым и 2-мя балансирными валами, где величина импульса возмущения от единственно неуравновешенного момента от сил инерции ВПДМ 1-го порядка составляет $L_{\delta, p. Mj1y} = 0,23$ рад.

Расчетные значения результирующего приведенного к моменту импульса возмущения $L_{\delta, p. \Sigma Mj}$ от действия неуравновешенных инерционных сил и моментов ВПДМ для крестообразной схемы коленчатого вала при других углах развала цилиндров приведены в табл. 2. Здесь для каждого варианта выполнены расчеты возмущения от действия инерционных сил и момента ВПДМ 1-го порядка после их частичного (оптимального) уравновешивания противовесами коленчатого вала с учетом действия неуравновешенного момента сил инерции 2-го порядка.

Как видно из табл. 2, полное уравновешение от инерционных сил и моментов без применения балансирных валов обеспечивается в широко распространенной схеме, соответствующей ДВС типа V-8 ($\gamma = 90^\circ$, $\delta = 0^\circ$). Однако при этом исключаются преимущества W-образных компоновок, когда за счет углов развала цилиндров в блоке ($\delta \neq 0$) можно обеспечить уменьшение длины ДВС. В целом сравнивая уравновешенность вариантов ДВС типа W8 с плоским (табл. 1) и крестообразным валами (табл. 2) видно, что первый вариант имеет весьма большую неуравно-

Таблица 2

Значения безразмерных результирующих импульсов возмущения $L_{\delta, p. \Sigma Mj}$ (рад) от действия неуравновешенных сил и моментов инерции после их частичного уравновешивания в ДВС типа W8 с крестообразным коленчатым валом

Угол развала цилиндров в блоке δ	Угол развала блока цилиндров γ					
	60°	66°	72°	78°	84°	90°
0°	2,33	1,87	1,41	0,94	0,47	0
10°	2,51	2,01	1,51	1,00	0,50	0,14
15°	2,69	2,16	1,61	1,07	0,55	0,21
20°	2,92	2,34	1,75	1,17	0,61	0,28

вешенность от действия сил инерции ВПДМ 2-го порядка и поэтому здесь во всех случаях целесообразно устанавливать балансирные валы. Во втором варианте основным источником возмущений являются в равной мере инерционные силы и моменты ВПДМ 1-го порядка, которые, во-первых, могут быть эффективно и достаточно просто частично уравновешены, во-вторых, возмущения от их действия сильно зависят от углов развала цилиндров и могут быть дополнительно уменьшены за счет выбора соответствующих углов. Для примера в табл. 2 выделены значения импульсов возмущений, для 2-х вариантов двигателя с крестообразным валом: 1-й при углах развала цилиндров соответствующих двигателю «Фольксваген Пассат W8» ($\gamma = 72^\circ$, $\delta = 15^\circ$), 2-й — при несколько иных углах ($\gamma = 84^\circ$, $\delta = 15^\circ$). Видно, что во втором варианте неуравновешенность существенно меньше (примерно в 3 раза).

Величины безразмерных результирующих импульсов возмущения $L_{\delta, p. \Sigma Mj}$ от действия всех неуравновешенных сил и моментов при крестообразном коленчатом вале (в табл. 2 их значения выделены) для различных углов развала цилиндров описываются регрессионной моделью:

$$L_{\delta, p. \Sigma Mj} = b_1 + b_2\delta + b_3\gamma + b_4\gamma\delta + b_5\gamma^2, \text{ (рад)},$$

где $b_1 = 9,106$; $b_2 = 6,061 \cdot 10^{-2}$; $b_3 = -1,375 \cdot 10^{-1}$; $b_4 = -5,758 \cdot 10^{-4}$; $b_5 = 4,086 \cdot 10^{-4}$.

С использованием данных, представленных в табл. 1 и 2, была выполнена сравнительная размерная количественная оценка общей уравновешенности вариантов ДВС типа W8, соответствующих по массогабаритным параметрам цилиндропоршневой группы двигателя «Фольксваген Пассат W8» с плоским и крестообразным коленчатым валом. Результаты сравнения показаны в табл. 3. Программным способом были рассчитаны значения импульсов возмущений от действий РКМ при полной нагрузке $L_{Mр}$ (Нмс) на разных частотах вращения. Заметим, что при равномерном чередовании рабочих ходов эти возмущения не зависят ни от углов развала, ни от схемы коленчатого вала. Для плоской схемы коленчатого

Таблица 3

Сравнение импульсов возмущений (Нмс) в ДВС типа W8 от действия реактивного крутящего момента при полной нагрузке $L_{Мр}$ на разных скоростных режимах

Параметр возмущения	Частота вращения n , об/мин								
	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500
$L_{Мр}$	0,889	0,659	0,519	0,424	0,355	0,303	0,260	0,226	0,197
$L_{М1пл}$	0,074	0,099	0,123	0,148	0,173	0,197	0,222	0,247	0,271
$L_{пр.Мкр}$	0,175	0,233	0,291	0,349	0,407	0,465	0,524	0,582	0,640

$L_{М1пл}$ — момент сил инерции 1-го порядка (плоская схема коленчатого вала, $\gamma = 72^\circ$, $\delta = 15^\circ$).

$L_{пр.Мкр}$ — результирующий приведенный момент от всех неуравновешенных сил (крестообразная схема коленчатого вала, $\gamma = 84^\circ$, $\delta = 15^\circ$).

вала оптимальными приняты углы развала $\gamma = 72^\circ$, $\delta = 15^\circ$, для крестообразной — $\gamma = 84^\circ$, $\delta = 15^\circ$ (здесь угол γ несколько увеличили для снижения возмущений — см. табл. 2). Для плоской схемы коленчатого вала за счет установки 2-х балансирных валов полностью уравновешены сила инерции ВПДМ 2-го порядка и ее момент, а момент от сил 1-го порядка уравновешен частично и является единственным источником возмущений. В табл. 3 показаны численные размерные (Нмс) значения импульса от источника возмущения $L_{М1пл}$. В рассматриваемом ДВС с крестообразной схемой коленчатого вала балансирные валы отсутствуют, но выполнено частичное уравновешивание силы инерции ВПДМ 1-го порядка и момента этой силы за счет нащечных противовесов. Существующий момент от сил 2-го порядка невелик, поэтому для его уравновешивания установка 2-х балансирных валов в этом случае нецелесообразна. Для наглядности анализа возмущения от инерционных сил и моментов просуммированы и представлены общим импульсом момента $L_{пр.Мкр}$ (безразмерное значение этого импульса соответствует величине $L_{б.р.пр.М}$).

Приведенные в табл. 3 результаты анализа свидетельствуют о высокой степени уравновешенности варианта двигателя с плоским коленчатым валом только при установке балансирных валов для уравновешивания сил инерции ВПДМ 2-го порядка. В то же время существует возмож-

ность реализации конструкции ДВС типа W8 с достаточно хорошей уравновешенностью и без применения балансирных валов (схема с крестообразным коленчатым валом).

Выводы

Выполнен сравнительный анализ оптимальных схем КШМ ДВС типа W8, обеспечивающих равномерное чередование рабочих ходов для конструкций с 4- коленными валами. Разработаны алгоритмы и программа анализа, позволяющего количественно оценивать уравновешенность различных вариантов ДВС типа W8, определять параметры уравновешивающих устройств для полного и частичного уравновешивания различных возмущений. Показано, что в ДВС с плоской схемой коленчатого вала для всех исследованных вариантов развала цилиндров существуют значительные возмущения от действия сил инерции ВПДМ 2-го порядка, которые целесообразно уравновешивать установкой балансирных валов. В ДВС с крестообразной схемой коленчатого вала существуют варианты углов развала цилиндров, где достаточная уравновешенность обеспечивается без применения балансирных валов. По результатам анализа разработаны регрессионные модели, позволяющие выполнять количественную оценку уравновешенности различных вариантов ДВС типа W8.

Литература

1. Volkswagen Group. Семейство двигателей W. — Программа самообучения 248 — Wolfsburg. — С. 6–20. [Электронный ресурс]. URL: http://www.autodela.ru/assets/files/books/VW/248_Wdvig_W8_W12_Volkswagen.pdf (дата обращения: 03.10.2014).
2. Гусаров В.В., Аишиин А.А. Новый способ оценки внутренних возмущений поршневых автомобильных ДВС // Машиностроение и инженерное образование. — 2009. — № 1 (18). — С. 15–21.
3. Тольский В.Е. Колебания силового агрегата автомобиля. — М. : Машиностроение, 1976. — 266 с.
4. Гусаров В.В. Анализ возмущающего действия неравномерного крутящего момента двигателя // Грузовик. — 2002. — № 6. — С. 27–30.