

ПРОФИЛИРОВАНИЕ КУЛАЧКОВ В СИСТЕМАХ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ТОПЛИВОПОДАЧИ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

*А.В. Васильев, д.т.н., проф., Д.В. Сидоров, аспирант;
Волгоградский государственный технический университет*

Известные методы профилирования кулачков в системах газораспределения и топливоподачи в ДВС не в полной мере учитывают скорость перемещения толкателя.

Предлагаемый численный метод позволяет путем введения ограничения на скорость перемещения толкателя получить кулачок, обеспечивающий постоянную скорость толкателя на заданном участке, произвести выбор размера тарелки толкателя и ограничить угол давления в сопряжении кулачок–толкатель.

В современных ДВС привод клапанов механизма газораспределения (МГР) и плунжера топливного насоса высокого давления (ТНВД) осуществляется, как правило, кулачковым механизмом. В связи с тем что МГР и ТНВД ДВС работают в условиях значительных нагрузок и оказывают существенное влияние на мощностные, экономические, экологические показатели и надежность двигателя, к профилю кулачка предъявляются жесткие требования. Функциональным требованием, предъявляемым к кулачкам МГР, является получение наибольшего время-сечения клапана при обеспечении работоспособности и надежности клапанного привода. Одним из главных направлений совершенствования ТНВД дизельных двигателей является повышение максимального давления впрыскивания.

Существует множество методов профилирования кулачков МГР и ТНВД, каждый из которых обладает рядом достоинств и недостатков [1, 2]. В данной работе будем рассматривать численный метод синтеза закона движения толкателя [3, 4], который позволяет формировать профиль кулачка в соответствии с предъявляемыми требованиями. В его основу положен принцип пошагового формирования закона движения толкателя с учетом задаваемых ограничений, позволяющий отказаться от заранее заданных схем описания характеристик движения толкателя или конфигурации профиля кулачка. При этом вместо аналитического закона движения используется численное его представление, а алгоритм формирования участков положительного и отрицательного ускорения обеспечивает получение

улучшенных характеристик при выполнении комплекса ограничений на контактное напряжение, угол давления, гидродинамические условия смазки в сопряжении кулачок–толкатель, радиус кривизны профиля кулачка, коэффициент запаса усилия клапанных пружин, а также высшие производные от перемещения толкателя по углу поворота кулачка.

Однако в рассматриваемом численном методе не предусмотрена возможность ограничения максимальной скорости перемещения поступательно движущегося толкателя с плоской тарелкой, от которой зависит получение максимального смещения точки контакта оси толкателя [1], т. е. требуемого размера его тарелки. Это имеет существенное значение при выборе габаритных размеров клапанного привода.

Кроме того, при профилировании кулачков МГР с цилиндрическим и рычажным толкателями важным является учет ограничений на угол давления в сопряжении кулачок–толкатель. При увеличении угла давления может снижаться коэффициент полезного действия кулачковой пары, при этом возрастают затраты мощности на привод клапанов и в предельном случае — возможно его заклинивание. Характеристика изменения угла давления по углу поворота кулачка в значительной степени зависит от закона движения толкателя, в особенности от скорости его перемещения [1].

В данной работе предлагается усовершенствовать численный метод путем введения ограничения на первую производную перемещения толкателя по углу поворота кулачка, т. е. на скорость перемещения толкателя. Данное ограничение позволяет получить кулачок с участком постоянной максимальной скорости толкателя, где ограничивается размер его тарелки и значение угла давления.

Метод профилирования кулачков с участком постоянной максимальной скорости толкателя может быть использован также в ТНВД. Здесь основная задача заключается в обеспечении интенсивного впрыскивания топлива. Она может быть решена путем увеличения скорости плунжера за счет изменения профиля кулачка при неизменной скорости вращения вала насоса. При этом повышается давление впрыскивания при

постоянной цикловой подаче [2]. В ТНВД кулачок с участком постоянной максимальной скорости позволяет получить такой закон движения толкателя, при котором скорость перемещения плунжера максимальна на участке нагнетания от геометрического начала (ГНН) до геометрического конца (ГКН). Это позволяет повысить максимальное давление впрыскивания.

Важно отметить, что наряду с введением ограничения на первую производную перемещения толкателя в усовершенствованном численном методе по-прежнему присутствует комплекс ограничений, связанных с обеспечением работоспособности и надежности МГР, например, ограничения на контактные напряжения в паре кулачок–толкатель. Предусмотрен также расчет данных, необходимых для изготовления и контроля профиля кулачка для кинематических схем.

Рассмотрим алгоритм формирования закона движения толкателя с учетом введения ограничения на первую производную S' перемещения толкателя. Участки AB_+ положительных и CB_- отрицательных значений второй производной S'' образуются, начиная соответственно от точек A и C (рис. 1, а, б), в которых заданы начальные условия. Участки формируются одновременно пошагово при равенстве значений S' в текущих точках B_+ и B_- с требуемой степенью точности, определяемой величиной шага $\Delta\varphi$, который может быть выбран достаточно малым. Значения S'' на каждом шаге выбираются максимальными по модулю, допускаемыми ограничениями на производные третьего и более высоких порядков, вычисляемые по формуле

$$S_i^{(k)} = \frac{S_i^{(k-1)} - S_{i-1}^{(k-1)}}{\varphi_i - \varphi_{i-1}}, \quad (1)$$

где $S_i^{(k)}$ — производная k -го порядка ($k > 2$) в i -й точке стыка отрезков; $S_i^{(k-1)}$ и $S_{i-1}^{(k-1)}$ — производные $(k-1)$ -го порядка соответственно в i -й и $(i-1)$ -й точках стыка отрезков; φ_i и φ_{i-1} — углы поворота кулачка соответственно в i -й и $(i-1)$ -й точках стыка отрезков.

Величины S' и S в текущей точке определяются на основе численного интегрирования

$$S'_i = S'_{i-1} + \frac{\varphi_i - \varphi_{i-1}}{2} S''_i + S''_{i-1}; \quad (2)$$

$$S_i = S_{i-1} + \frac{\varphi_i - \varphi_{i-1}}{2} S'_i + S'_{i-1}, \quad (3)$$

где S''_i , S''_{i-1} — значения второй производной в i -й и $(i-1)$ -й точке; S_i , S_{i-1} — значения перемещения толкателя в i -й и $(i-1)$ -й точке.

Таким образом, зная на каждом шаге значения ускорения, скорости и перемещения толкателя,

определяем по известным зависимостям [1] текущие значения ограничиваемых параметров, связанных с работоспособностью и надежностью МГР.

Если на текущем шаге невозможно удовлетворить комплекс задаваемых ограничений, осуществляется уменьшение модуля значения S'' на одном из предшествующих шагов, ближайших к текущему, причем это уменьшение должно допускаться имеющимися ограничениями (1) на производные. Затем снова проверяется возможность формирования текущего шага, и эта процедура повторяется до тех пор, пока на текущем шаге не будет выбрано значение S'' , удовлетворяющее ограничениям.

На рис. 1, в, видно, что при таком ограничении на первую производную перемещения толкателя на определенном этапе формирования закона движения толкателя производится уменьшение до нуля модулей значений S'' в точках B_+ и B_- . При этом величины S' в точках B_+ и B_- равны максимально допустимому значению S'_{\max} с требуемой точностью, определяемой значениями $\Delta\varphi$ и шагом коррекции $\Delta S''$, а величина S отличается на величину ΔS разности между значениями перемещения толкателя в точках B_- и B_+ , т. е.

$$\Delta S = S_{B_-} - S_{B_+}, \quad (4)$$

где S_{B_-} , S_{B_+} — значения перемещения толкателя в точках B_- и B_+ (рис. 1, в), определяемые по формуле (3).

Далее образуется участок постоянной максимальной скорости, где первая производная перемещения толкателя по углу поворота кулачка имеет максимально допустимое значение, а значение перемещения толкателя изменяется линейно (рис. 1, з).

Протяженность этого участка постоянной максимальной скорости определяется по формуле

$$\varphi_0 = \frac{\Delta S}{S'_{\max}}. \quad (5)$$

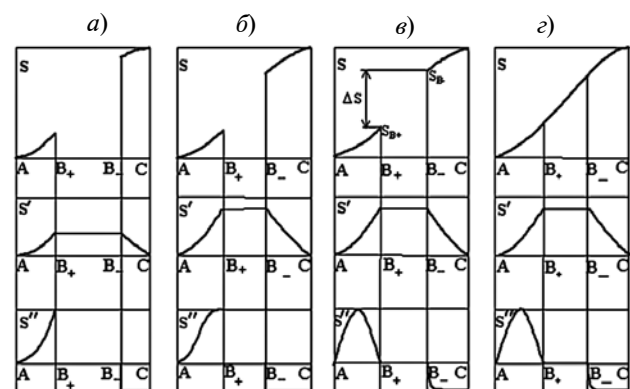


Рис. 1. Расчетная схема формирования закона движения толкателя

Если ограничение на первую производную перемещения толкателя не является активным, то формирование профиля кулачка выполняется согласно описанному ранее алгоритму [3, 4].

Таким образом, реализованный метод формирования закона движения толкателя отличается тем, что значения второй производной в точках стыка смежных отрезков по модулю максимальны при выполнении ограничения на первую производную, а между участками положительных и отрицательных значений может располагаться участок постоянной максимальной скорости, угловая протяженность φ_0 которого определяется по формуле (5).

Рассмотрим некоторые результаты, полученные при формировании закона движения толкателя МГР. Профилирование кулачка осуществлялось при следующих значениях параметров кулачкового привода: радиус тарелки плоского толкателя 44 мм, максимальное перемещение толкателя 10 мм. Заданная угловая протяженность участка подъема составляла 100° угла поворота кулачка с верхним выстоем толкателя. Величина ограничения выбрана исходя из требования по габаритным размерам тарелки плоского толкателя и составляет $S'_{\max} = 10,8$ мм/рад.

На рис. 2 приведена зависимость перемещения толкателя с плоской тарелкой в зависимости от угла поворота кулачка. Кривая 1 соответствует перемещению толкателя с участком постоянной максимальной скорости, кривая 2 — штатному кулачку. При формировании закона движения толкателя требуемое максимальное смещение точки контакта оси толкателя, определяющее максимальный диаметр тарелки плоского толкателя, у кулачка с участком постоянной максимальной скорости достигается ограничением на первую производную перемещения толкателя (рис. 3, кривая 1). В то же время для штатного кулачка [3, 4] той же самой угловой протяженности

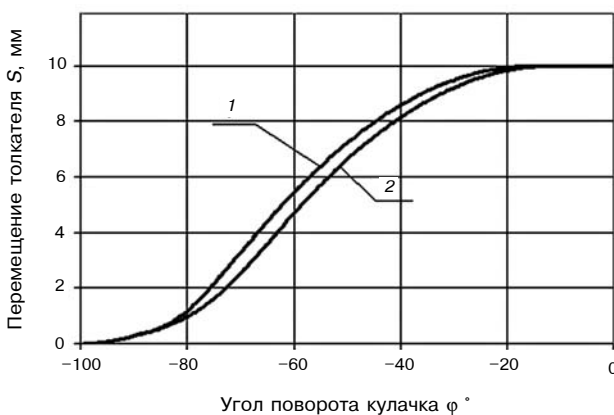


Рис. 2. Подъем толкателя с плоской тарелкой в зависимости от угла поворота кулачка:

1 — кулачок с участком постоянной максимальной скорости; 2 — существующий кулачок

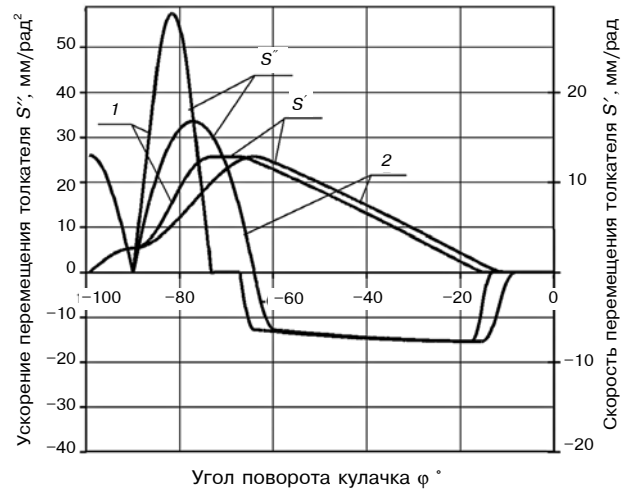


Рис. 3. Первая и вторая производная перемещения толкателя с плоской тарелкой в зависимости от угла поворота кулачка:

1 — кулачок с участком постоянной максимальной скорости; 2 — существующий кулачок

получение требуемого диаметра тарелки плоского толкателя может быть достигнуто путем ужесточения ограничений на производные второго и более высоких порядков (рис. 3, кривая 2). Однако это снизит площадь под кривой перемещения толкателя (рис. 2, кривая 2). Из сравнения можно увидеть, что использование предлагаемого кулачка привода клапана (рис. 2, кривая 1) позволяет увеличить на 5 % площадь под кривой перемещения толкателя при удовлетворении ограничения на первую производную перемещения толкателя.

На рис. 4 приведена зависимость изменения угла давления χ в сопряжении кулачок—цилиндрический толкатель. Профилирование кулачка осуществлялось при тех же значениях максимального перемещения толкателя и угловой протяженности участка подъема толкателя. Радиус цилиндрической поверхности толкателя, контак-

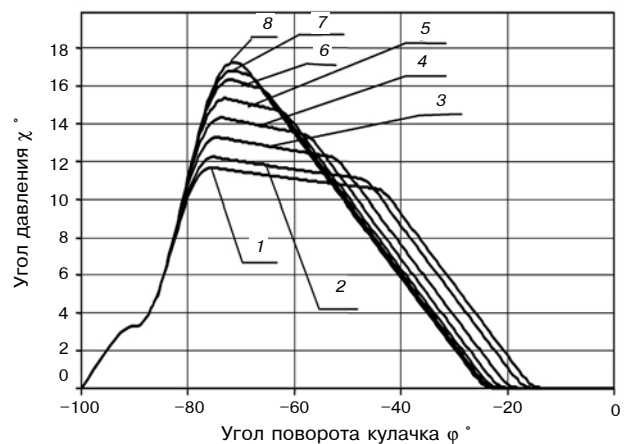


Рис. 4. Угол давления цилиндрического толкателя в зависимости от угла поворота кулачка:

1–8 — кривые, соответствующие различным ограничениям на первую производную перемещения толкателя (рис. 5)

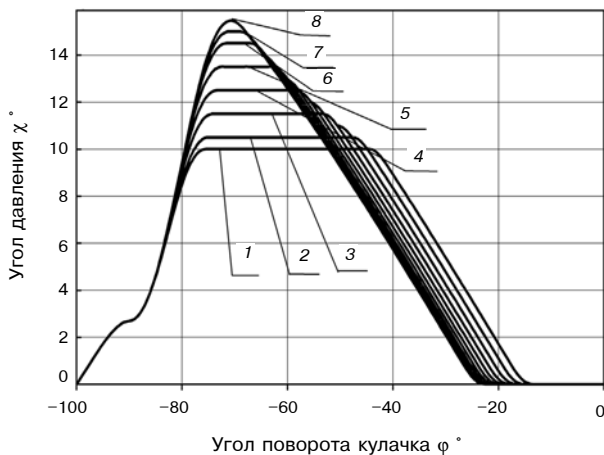


Рис. 5. Скорость перемещения цилиндрического толкателя в зависимости от угла поворота кулачка

тирующей с кулачком, составляет 25 мм. Величина ограничения может быть выбрана исходя из требуемой долговечности работы сопряжения кулачок—толкатель. В данном примере ограничение на первую производную перемещения толкателя было принято $S'_{\max} \leq 10,8$ мм/рад.

Следует отметить, что на участке постоянной максимальной скорости толкателя происходит практически линейное изменение угла давления (рис. 4). Причем с ужесточением ограничений на первую производную перемещения толкателя (рис. 5) увеличивается протяженность наклонного участка угла давления и уменьшается его максимальное значение (см. рис. 4). Таким образом, кулачок с участком постоянной максимальной скорости позволяет формировать законы движения цилиндрического толкателя предельной эффективности с учетом требований по углу давления.

Рассмотрим также некоторые результаты, полученные при формировании закона движения толкателя ТНВД. Профилирование кулачка осуществлялось при следующих значениях параметров кулачкового привода: радиус начальной окружности кулачка 10 мм, радиус цилиндрической поверхности толкателя, контактирующей с кулачком, 8,25 мм, максимальное перемещение толкателя 8 мм. Заданная угловая протяженность участка подъема составляла 63° угла поворота кулачка. Величина ограничения может быть выбрана исходя из требуемого максимального давления впрыскивания топлива; в данном примере реализации метода расчета ограничение на первую производную перемещения толкателя было принято $S'_{\max} \leq 7,6$ мм/рад.

На рис. 6 приведена зависимость скорости перемещения толкателя ТНВД в зависимости от угла поворота кулачка.

Параметры профиля могут быть выбраны таким образом, чтобы точки ГНН и ГКН находились на участке постоянной максимальной

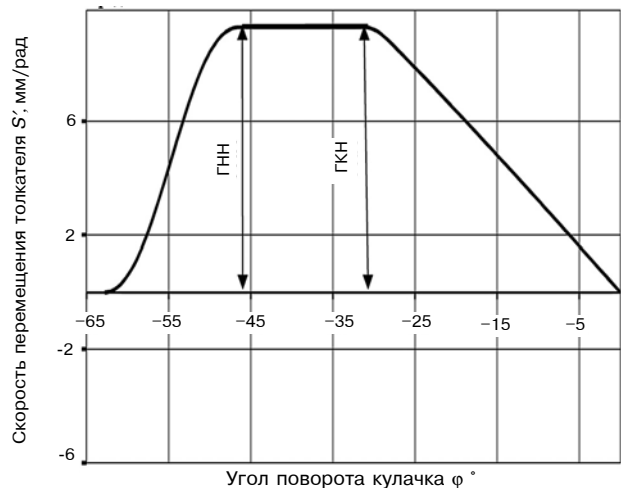


Рис. 6. Скорость перемещения толкателя топливного насоса в зависимости от угла поворота кулачка

скорости. Это позволяет повысить максимальное давление впрыскивания топлива.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что кулачок с участком постоянной максимальной скорости, спрофилированный усовершенствованным численным методом, может дать ряд преимуществ. Удовлетворение требований по габаритным размерам тарелки поступательно движущегося плоского толкателя может быть достигнуто путем ограничения на первую производную его перемещения. При этом с ужесточением ограничения уменьшается максимальное значение угла давления в сопряжении кулачок—толкатель. В ТНВД кулачок с участком постоянной максимальной скорости позволяет повысить максимальное давление впрыскивания вследствие того, что скорость перемещения плунжера максимальна на участке нагнетания. По результатам выполненной работы подана заявка на изобретение кулачка с участком постоянной максимальной скорости.

Литература

1. Корчемный Л.В. Механизм газораспределения автомобильного двигателя: кинематика и динамика. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1981.
2. Файнлейб Б.Н., Лебедев В.А. Оптимизация параметров кулачкового механизма дизельных насосов высокого давления // Двигателестроение. — 1990. — 298 с.
3. Патент Российской Федерации № 2128776, 6F 01 L 1/08. — Кулачок привода клапана / Е.А. Григорьев, А.В. Васильев. — № 97108925/06; Заявлено 30.05.97; Опубл. 10.04.99, Бюл. № 10, ч. 2. — С. 441.
4. Васильев А.В., Григорьев Е.А. Обобщенный численный метод профилирования кулачков // Тракторы и сельскохозяйственные машины. — 1999. — № 2. — С. 15–18.