

УДК 621.436

А.А. ПРОХОРЕНКО, Д.В. МЕШКОВ, Д.Е. САМОЙЛЕНКО

Национальный технический университет «ХПИ», Харьков, Украина

ВЫБОР ОСНОВНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ФОРСУНКИ ДИЗЕЛЯ

Основным видом топливной аппаратуры современных дизелей является аккумуляторная система (типа *Common-Rail*) с теми или иными конструктивными особенностями [1]. Однако, при любой комплектации, главным узлом такой системы, обеспечивающим цикловую подачу топлива в цилиндр и ее регулирование, является форсунка с электрогидравлическим управлением (ЭГФ). ЭГФ представляет собой сложную гидравлическую систему, состоящую из полостей переменных объемов, каналов, золотников, клапанов и жиклеров, взаимодействующих между собой. Предлагаемая ниже методика позволяет провести предварительный выбор основных конструктивных параметров камеры управления при проектировании новой ЭГФ исходя из обеспечения работоспособности форсунки и ее быстродействия.

Ключевые слова: аккумуляторная система, форсунка с электрогидравлическим управлением, камера управления.

Введение

ЭГФ представляет собой сложную гидравлическую систему, состоящую из полостей переменных объемов, каналов, золотников, клапанов и жиклеров, взаимодействующих между собой. Такая сложность конструкции приводит к тому, что ее работоспособность лежит в узкой области рациональных значений параметров перечисленных элементов: масс, объемов, диаметров сечений, длин и др. Кроме того, помимо обеспечения работоспособности, к гидромеханической схеме ЭГФ предъявляются жесткие требования по быстродействию [2]. Быстродействие, в свою очередь, значительно зависит от скорости опорожнения (при открытии иглы) и наполнения (при закрытии) камеры управления (КУ), обязательно имеющейся в конструкции любой ЭГФ. Именно в КУ создается требуемый перепад давления топлива, позволяющий перемещать иглу (запорный орган) форсунки под действием гидравлической силы.

Схематично работу управляющей камеры ЭГФ можно проиллюстрировать рис. 1. Перед началом впрыскивания в объеме КУ (V) топливо находится под давлением, равным давлению в аккумуляторе p_2 . При подаче управляющего сигнала на электромагнитный клапан (ЭМК) последний открывает стравливающий жиклер с площадью эффективного проходного сечения μf_2 . Из объема КУ топливо вытекает в дренажную полость (где давление p_0 , как правило, близко к атмосферному), и давление в нем падает до текущего значения p . Через наполнительный жиклер с эффективным проходным сечением μf_1 в КУ при этом поступает топливо под действием перепада давлений $p_2 - p$. Та-

ким образом, гидравлическая сила от действия давления топлива на площадь торца мультипликатора запираания (МЗ) уменьшается, что и приводит к поднятию иглы под действием давления p_2 на дифференциальную площадку.

При снятии сигнала с ЭМК стравливающий жиклер закрывается клапаном под действием пружины. Давление в КУ восстанавливается до p_2 в результате перетекания топлива через наполнительный жиклер, гидравлическая сила на площадь торца МЗ увеличивается, и игла садится на запирающий конус.

Описанный принцип действия обуславливает значительное влияние быстродействия КУ на общее быстродействие форсунки, и зависит от площадей проходного сечения наполнительного и стравливающего жиклеров и объема КУ.

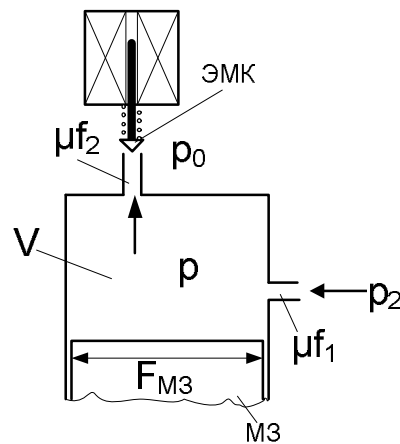


Рис. 1. Схема управляющей камеры ЭГФ:
ЭМК – электромагнитный клапан
МЗ – мультипликатор запираания

На этапе проектирования новых конструкций ЭГФ сложно определить значения перечисленных конструктивных параметров без подробного математического моделирования работы форсунки [4].

Предлагаемая ниже методика позволяет провести предварительный выбор основных конструктивных параметров КУ при проектировании новой ЭГФ исходя из обеспечения работоспособности форсунки и ее быстродействия.

Статический анализ устройства

Подъем иглы форсунки происходит при выполнении условия:

$$pF_{M3} + P_{пр} < p_2 F_d + p_{ц} F_k, \quad (1)$$

где p , p_2 , $p_{ц}$ – соответственно давление топлива в КУ, аккумулятора, газов в цилиндре, F_{M3} , F_k , F_d – соответственно, площадь поперечного сечения МЗ, запирающего конуса, дифференциальная площадка, $P_{пр}$ – сила предварительной затяжки пружины форсунки.

При этом пружина предназначена для предотвращения заброса газов в полость форсунки при отсутствии давления в аккумуляторе [2, с. 113], из чего следует, что $P_{пр} \approx p_{ц} F_k$.

Тогда условие (1) примет вид

$$pF_{M3} < p_2 F_d, \quad (2)$$

и, следовательно, требуемое давление в КУ для подъема иглы определится равенством:

$$p = p_2 \frac{F_d}{F_{M3}}. \quad (3)$$

Исходя из равенства расходов топлива через наполнительный и стравливающий жиклеры при открытом ЭМК,

$$\mu f_1 \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_2 - p)} = \mu f_2 \sqrt{\frac{2}{\rho}(p - p_0)}, \quad (4)$$

следует, что для достижения требуемого давления p в КУ необходимо обеспечить соотношение площадей проходного сечения жиклеров $\mu f_2/\mu f_1$, равное:

$$\frac{\mu f_2}{\mu f_1} = \sqrt{\frac{p_2 - p}{p - p_0}}. \quad (5)$$

Обозначим $\mu f_2/\mu f_1 = x$, тогда $\mu f_2 = x\mu f_1$.

Из (4) также следует, что в КУ установится равновесное давление

$$p = \frac{\mu f_1^2 p_2 + \mu f_2^2 p_0}{\mu f_1^2 + \mu f_2^2} = \frac{p_2 + x^2 p_0}{1 + x^2}. \quad (6)$$

Перейдем к относительной величине:

$$\frac{p}{p_2} = \frac{1 + x^2 p_0/p_2}{1 + x^2}. \quad (7)$$

Поскольку относительная величина p_0/p_2 значи-

тельно меньше 1 (она имеет порядок $10^{-2} \dots 10^{-3}$), можно пренебречь вторым слагаемым в числителе выражения (7) и перейти к упрощенному соотношению:

$$\frac{p}{p_2} \approx \frac{1}{1 + x^2}. \quad (8)$$

Зависимость p/p_2 в полости КУ от отношения площадей проходных сечений жиклеров x , полученная по формуле (8), показана на рис. 2. Воспользовавшись формулами (3) и (8) можно определить граничное значение параметра x для КУ с точки зрения обеспечения работоспособности форсунки.

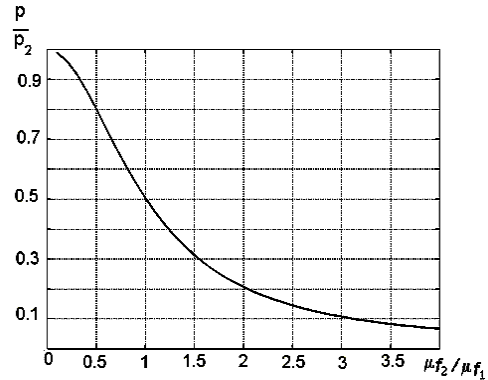


Рис. 2. Зависимость относительного изменения давления в КУ от отношения площадей жиклеров

Динамический анализ системы

При рассмотрении гидравлических процессов в КУ примем следующие допущения:

1. Объем полости КУ в результате движения иглы (мультипликатора запирающего) меняется несущественно, следовательно можно принять $V = \text{const}$.
2. Коэффициент сжимаемости топлива не зависит от давления, то есть принимаем $\alpha = \text{const}$.
3. Временем открытия управляющего клапана можно пренебречь.

После открытия ЭМК уравнение объемного баланса для полости КУ будет иметь вид:

$$\alpha V \frac{dp}{dt} = \mu f_1 \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_2 - p)} - \mu f_2 \sqrt{\frac{2}{\rho}(p - p_0)}, \quad (9)$$

где t – текущее время от момента открытия ЭМК стравливающего жиклера.

Отсюда выразим dt :

$$dt = \frac{\alpha V dp}{\mu f_1 \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_2 - p)} - \mu f_2 \sqrt{\frac{2}{\rho}(p - p_0)}}, \quad (10)$$

и решим полученное дифференциальное уравнение относительно времени t .

$$t = \alpha V \int_{p_2}^p \frac{dp}{\mu f_1 \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_2 - p)} - \mu f_2 \sqrt{\frac{2}{\rho}(p - p_0)}}. \quad (11)$$

Выражение для определенного интеграла (11)

имеет достаточно громоздкий вид [3]:

$$t = \sqrt{2\rho\alpha V} \frac{(A_1 + A_2 + A_3)}{\sqrt{(\mu f_1^2 + \mu f_2^2)^3}} \Big|_{p_2}^p, \quad (12)$$

где $A_1 = -(\mu f_1 \sqrt{p_2 - p} + \mu f_2 \sqrt{p - p_0}) \sqrt{\mu f_1^2 + \mu f_2^2}$,

$$A_2 = \mu f_1 \mu f_2 \sqrt{p_2 - p_0} \operatorname{arctg} \left(\frac{\sqrt{\mu f_1^2 + \mu f_2^2} \sqrt{p_2 - p}}{\mu f_2 \sqrt{p_2 - p_0}} \right),$$

$$A_3 = \mu f_1 \mu f_2 \sqrt{p_2 - p_0} \operatorname{arctg} \left(\frac{\sqrt{\mu f_1^2 + \mu f_2^2} \sqrt{p - p_0}}{\mu f_1 \sqrt{p_2 - p_0}} \right).$$

Далее, при подстановке нижнего предела, получим:

$$t = \sqrt{2\rho\alpha V} \times \frac{(A_1 + A_2 + A_3 - A_1(p_2) - A_2(p_2) - A_3(p_2))}{\sqrt{(\mu f_1^2 + \mu f_2^2)^3}}, \quad (13)$$

где

$$A_1(p_2) = -\mu f_2 \sqrt{p_2 - p_0} \sqrt{\mu f_1^2 + \mu f_2^2}, \quad A_2(p_2) = 0,$$

$$A_3(p_2) = \mu f_1 \mu f_2 \sqrt{p_2 - p_0} \operatorname{arctg} \left(\frac{\sqrt{\mu f_1^2 + \mu f_2^2}}{\mu f_1} \right).$$

Аналогичный подход применим и для описания процесса изменения давления в КУ после закрытия ЭМК – при этом происходит наполнение полости через один жиклер в соответствии с уравнением:

$$\alpha V \frac{dp}{dt_1} = \mu f_1 \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_2 - p)}, \quad (14)$$

где t_1 – текущее время от момента закрытия ЭМК срабатывающего жиклера.

Тогда

$$dt_1 = \frac{\alpha V dp}{\mu f_1 \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_2 - p)}}, \quad (15)$$

откуда можно определить:

$$t_1 = \frac{\alpha V}{\mu f_1} \int_p^{p_2} \frac{dp}{\sqrt{\frac{2}{\rho} (p_2 - p)}}, \quad (16)$$

и, после вычисления определенного интеграла, искомое выражение примет вид:

$$t_1 = -\alpha V \sqrt{\frac{\rho}{2}} \frac{2\sqrt{(p_2 - p)}}{\mu f_1} \Big|_p^{p_2} = \frac{\alpha V}{\mu f_1} \sqrt{2\rho(p_2 - p)}. \quad (17)$$

Полученные выражения (13) и (17) позволяют определить время на установление в полости КУ давления p (при открытии форсунки) и p_2 (при за-

крытии), что и будет характеризовать ее быстродействие. Кроме того, эти формулы позволяют исследовать характер и степень влияния площади проходного сечения жиклеров на быстродействие КУ и, таким образом, установить рациональные их значения.

Пример результатов расчета быстродействия КУ с использованием указанных выражений (13) и (17) приведен на рис. 3. При проведении этих расчетов были приняты следующие значения: плотность топлива $\rho = 850 \text{ кг/м}^3$, коэффициент сжимаемости $\alpha = 42 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$, объем КУ $V = 200 \text{ мм}^3$, давление в дренажной полости $p_0 = 0,25 \text{ МПа}$, давление в аккумуляторе $p_2 = 130 \text{ МПа}$; площадь проходного сечения дросселей μf_2 и μf_1 переменная.

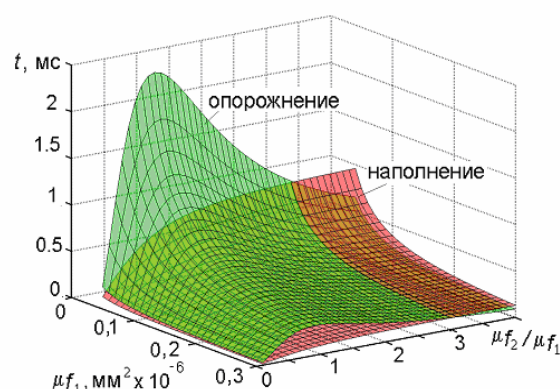


Рис. 3. Быстродействие КУ по опорожнению и наполнению

Анализ полученных результатов показывает, что:

1. Быстродействие КУ как по опорожнению, так и по наполнению увеличивается (время процесса установления соответствующего значения давления уменьшается) при увеличении площади проходного сечения наполнительного жиклера μf_1 .

2. При увеличении отношения площадей $\mu f_2 / \mu f_1$ до уровня $x = 1$ быстродействие КУ по наполнению уменьшается, а при последующем увеличении x уменьшается незначительно.

3. При увеличении отношения площадей $\mu f_2 / \mu f_1$ до уровня $x = 1$ быстродействие КУ по опорожнению уменьшается, а при последующем увеличении x – увеличивается.

4. При отношении площадей $\mu f_2 / \mu f_1$ на уровне $x = 3$ быстродействие КУ по опорожнению и наполнению ее полости совпадает. Очевидно, что именно это соотношение – $\mu f_2 = 3\mu f_1$ и является рациональным.

Зависимость быстродействия КУ от эквивалентного диаметра наполнительного жиклера $d_{\text{экв}}$ при выбранном рациональном значении $x = 3$ приведено на рис. 4. При этом значение $d_{\text{экв}}$ определено из условия:

$$d_{\text{ЭКВ}} = 2\sqrt{\frac{\mu f_1}{\pi}}. \quad (18)$$

Пользуясь приведенными на рисунке графиком можно, например, определить, что для обеспечения быстродействия по опорожнению и наполнению КУ объемом $V = 200 \text{ мм}^3$, равного 0,4 мс, требуются жиклеры диаметром $d_{\text{ЭКВ}} = 0,35 \text{ мм}$ – наполнительный и $d_{\text{ЭКВ}} = 1,05 \text{ мм}$ – сравливающий. Для увеличения быстродействия следует увеличить диаметры жиклеров в соответствии с выбранной пропорцией. Однако, необходимо учитывать, что увеличение площади проходного сечения жиклеров КУ приводит к возрастанию расхода топлива на управление форсункой. Также следует заметить, что, как видно из выражений (13) и (17), быстродействие (время) прямо пропорционально объему V полости КУ. Следовательно, более эффективным является достижение требуемого быстродействия с помощью уменьшения этого параметра.

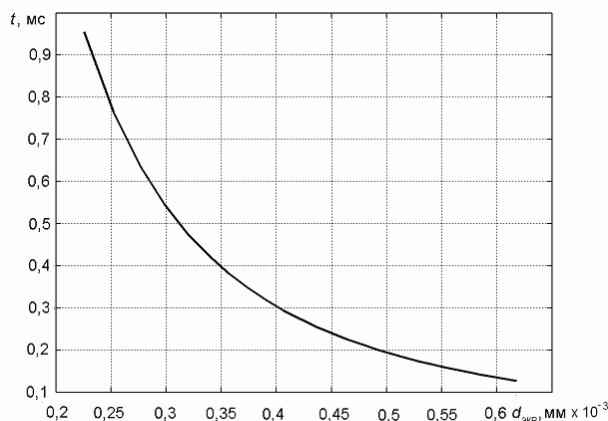


Рис. 4. Зависимость быстродействия КУ от диаметра наполнительного жиклера

Система управления на основе топливной аппаратуры аккумуляторного типа построена таким образом, что давление в топливном аккумуляторе p_2 переменнo в зависимости от режима работы двигателя [2]. Следовательно, важным является вопрос о влиянии уровня этого параметра на быстродействие форсунки. Известно, что при снижении p_2 быстродействие форсунки во время подъема иглы падает [2], что вызвано уменьшением значения гидравлической поднимающей силы, и, следовательно, меньшим ускорением движения иглы. Однако, расчетное исследование, проведенное с использованием полученных в данной работе выражений (13) и (17) показывает, что быстродействие самой КУ при снижении давления в аккумуляторе повышается. Сказанное проиллюстрировано на рис. 5. Обнаруженный эффект объясняется тем, что при абсолютном уменьшении давления в КУ величина относительного изменения (p/p_2) остается постоянной, поскольку

определяется только соотношением площадей проходного сечения жиклеров $\mu f_2/\mu f_1$ (см. (8)). Следовательно, степень изменения достигаемого давления в КУ превалирует над уменьшением скорости истечения через жиклеры.

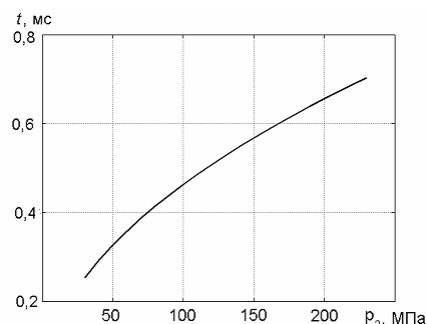


Рис. 5. Зависимость быстродействия КУ от величины давления в аккумуляторе

Выводы

1. На основе физико-математического анализа разработана методика расчетов по выбору конструктивных параметров камеры управления ЭГФ на этапе ее проектирования. Определенные таким образом значения площадей проходного сечения жиклеров КУ обеспечивают работоспособность гидравлической системы ЭГФ, находятся вблизи оптимальных для обеспечения ее быстродействия и малого расхода топлива на управление, и могут быть приняты в качестве исходных данных для дальнейшей оптимизации на основе полного математического моделирования работы ЭГФ.

2. Выполненные исследования показали, что рациональное значение отношения площадей эффективного проходного сечения сравливающего и наполнительного жиклеров КУ имеет значение $\mu f_2/\mu f_1 = 3$. В этом случае быстродействие по опорожнению полости КУ равно быстродействию по ее наполнению.

3. Для увеличения быстродействия ЭГФ необходимо обеспечить минимальный объем ее КУ.

4. При уменьшении давления в аккумуляторе быстродействие ЭГФ по КУ увеличивается.

Литература

1. Mollenhauer K. *Handbook of Diesel Engines* / K. Mollenhauer, H. Tschoeke – Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer, 2010. – 636 p.
2. Грехов Л.В. *Топливная аппаратура и системы управления дизелей. Учебник для вузов* / Л.В. Грехов, Н.А. Иващенко, В.А. Марков. – М.: Легион-Автодата, 2004. – 344 с.
3. Wolfram Mathematica Online Integrator [Электронный ресурс] / Wolfram Research, Inc. – Электрон. дан. – 2010. — Режим доступа к ресурсу

су: <http://integrals.wolfram.com>, свободный. – Загл. с экрана. – Текст на экране англ.

4. Прохоренко А.А. Оптимизация конструктивных параметров пьезоэлектрической дизельной

форсунки / А.А. Прохоренко, Д.В. Мешков, Д.Е. Самойленко // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту: науково-виробничий збірник; АДІ ДонНТУ. – Горлівка, 2010. – № 1 (10). – С. 47-53.

Поступила в редакцию 30.04.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры В.Г. Дьяченко, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков, Украина.

ВИБІР ОСНОВНИХ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНОЇ ФОРСУНКИ ДИЗЕЛЯ

А.О. Прохоренко, Д.В. Мешков, Д.Є. Самойленко,

Основним видом паливної апаратури сучасних дизелів є акумуляторна система (типу Common-Rail) з тими або іншими конструктивними особливостями. Однак, при будь-якій комплектації, головним вузлом такої системи, що забезпечують циклову подачу палива в циліндр і її регулювання, є форсунка з електрогідравлічним керуванням (ЕГФ). ЕГФ являє собою складну гідравлічну систему, що складається з порожнин змінних обсягів, каналів, золотників, клапанів і жиклерів, взаємодіючих між собою. Запропонована в статті методика дозволяє провести попередній вибір основних конструктивних параметрів камери керування при проектуванні нової ЕГФ виходячи із забезпечення працездатності форсунки і її швидкодії.

Ключевые слова: акумуляторна система, форсунка з електрогідравлічним керуванням, камера керування.

A CHOICE OF A MAIN CONSTRUCTION PARAMETERS IN ELECTROHYDRAULIC INJECTOR OF A DIESEL ENGINE

A.A. Prochorenko, D.V. Meshkov, D.E. Samojlenko

The main part of the fuel delivery system in modern diesels is Common Rail system with this or that features. The major unit of any Common Rail system, that provides fuel delivery processes is injector with electrohydraulic control. Injector is a complex hydraulic system and consist of variable volume cavities, channels, slides, valves and jets interacted among themselves. Methodology offered in the article allows to make a preselection of the main construction parameters in the control chamber during new injector designing. This preselection took place according to workability and performance of the injector.

Key words: Common Rail, injector with electrohydraulic control, control chamber.

Прохоренко Андрей Алексеевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры двигателей внутреннего сгорания Национального технического университета «ХПИ», Харьков, Украина, e-mail: prokhorenko@kpi.kharkov.ua.

Мешков Денис Викторович – канд. техн. наук, ассистент кафедры двигателей внутреннего сгорания Национального технического университета «ХПИ», Харьков, Украина, e-mail: denys.meshkov@mail.ru.

Самойленко Дмитрий Евгеньевич – канд. техн. наук, научный сотрудник кафедры двигателей внутреннего сгорания Национального технического университета «ХПИ», Харьков, Украина, e-mail: dima_samojlenko@hotmail.com.