

УДК 621.436

Марченко А.П., д-р техн. наук, Прохоренко А.А., канд. техн. наук, Мешков Д.В., асп.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ФОРСУНКЕ СИСТЕМЫ CR В СРЕДЕ MATLAB/SIMULINK

Проектирование, изготовление и доводка аккумуляторной топливной аппаратуры является сложным, трудоемким и дорогостоящим процессом. В условиях проектирования элементов системы топливной аппаратуры значительно возрастает роль систем компьютерного моделирования. В настоящее время ведущими зарубежными фирмами и научно-исследовательскими институтами создан ряд программных комплексов для проектирования и доводки элементов аккумуляторной топливной системы. Одним из таких комплексов есть разработка МТГУ им. Баумана ВПРЫСК, предназначенный для математического моделирования и компьютерной оптимизации топливоподачи в двигателях внутреннего сгорания [1]. Применение систем математического моделирования позволяет значительно сократить время и стоимость разработки элементов топливной аппаратуры, проводить оптимизацию конструкций таких элементов как топливные форсунки и насос. На кафедре ДВС НТУ «ХПИ» создана оригинальная математическая модель аккумуляторной топливной системы с использованием пакета компьютерной математики и моделирования MATLAB/Simulink.

Целью статьи является описание математической модели электрогидравлической форсунки аккумуляторной топливной системы Common Rail, реализованной в системе компьютерной математики и моделирования MATLAB/Simulink. Модель позволяет достаточно просто не только рассчитать, но и визуализировать все процессы, происходящие в форсунке, а именно – изменение давления в различных полостях, текущие перемещения, скорости и ускорения подвижных элементов и др.

В предложенной математической модели использована модель электрогидравлической топливной форсунки с электромагнитным клапаном, которой обеспечивает управление давлением в наддвигательной полости. Принцип действия форсунки описан в [2, 7]. В момент начала серийного выпуска в 1997 году все производимые топливные форсунки были реализованы именно по такой схеме. Данное решение характеризуется относительной простотой конструкции (в сравнении с альтернативными конструкциями) и надежностью работы. Стоит отметить, что одно из ведущих предприятий мира по выпуску элементов топливных систем дизелей Robert Bosch, выпускало топливные форсунки данной схемы с 1997 по 2003 год (первое и второе поколение Common Rail), пока им на смену не пришли более простые, и одновременно с этим, более дорогие пьезоэлектрические топливные форсунки. Спектр двигателей, которые могут быть укомплектованы системами Common Rail, довольно широк: от малых дизелей для сельхозтехники до тепловозных и судовых установок [3-6]. В условиях украинского рынка и уровня промышленного развития более предпочтительными для освоения являются именно электрогидравлические форсунки. Следовательно, математическая модель имеет перспективу применения при создании отечественного образца аккумуляторной системы, ее доводки и разработки алгоритма системы автоматического управления.

Расчетная схема электромагнитной дизельной форсунки приведена на рис. 1. На рисунке имеется следующая система обозначений, принятая в разработанной математической модели: p_0 – давле-

ние топлива в дренажной магистрали; d_0 – диаметр дросселирующего отверстия слива; d_1 – диаметр мультипликатора запираания; d_2 – диаметр наполнительного дросселирующего отверстия; p_1, V_1 – давление и текущий объем в полости мультипликатора запираания; p_2 – давление топлива в аккумуляторе; d_u – диаметр иглы распылителя; d_k – диаметр запирающего конуса; p_c – давление топлива в носке распылителя; p_u – давление газа в цилиндре в районе ВМТ на такте сжатия; μ_{fp} – эффективное проходное сечение распыливающих отверстий; $\mu_{эк}f_{эк}$ – эффективное проходное сечение конуса распылителя; $d_{0в}, d_{0н}$ – диаметры соответственно перед и после дросселирующего отверстия слива по ходу течения топлива.

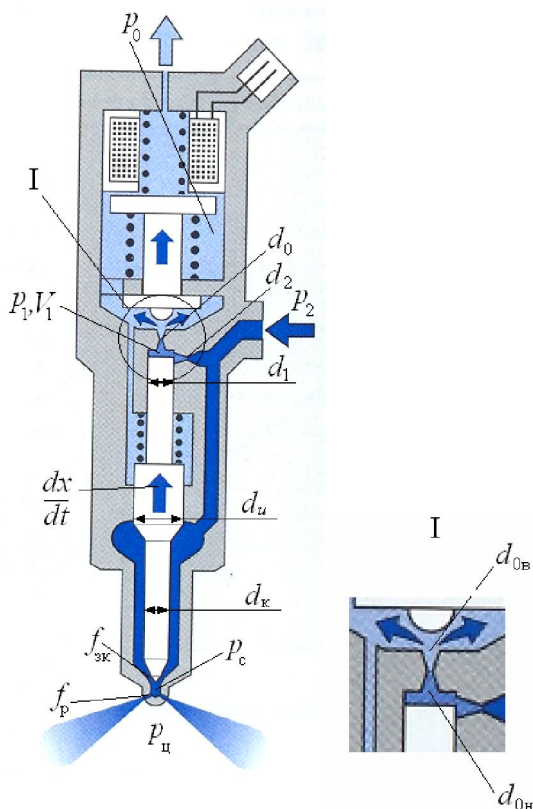


Рис. 1. Расчетная схема электромагнитной форсунки

В основе математической модели положена система дифференциальных уравнений движения топлива [8]:

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial x} + \rho \frac{\partial u}{\partial t} + 2\rho k u = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{a^2 \rho} \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \end{cases}$$

Где, x и t – длина топливопровода и время, p и u – давление и скорость топлива, k – фактор гидравлического сопротивления, a – скорость звука в топливе, ρ – плотность топлива.

Как известно, решение данной системы имеет вид [8]:

$$\begin{aligned} p &= p_0 + F \left(t - \frac{x}{a} \right) e^{-k\tau_1} - W \left(t + \frac{x}{a} \right) e^{-k\tau_2} \\ u &= u_0 + \frac{1}{a\rho} \left[F \left(t - \frac{x}{a} \right) e^{-k\tau_1} + W \left(t + \frac{x}{a} \right) e^{-k\tau_2} \right] \end{aligned}$$

Здесь, p_0 и u_0 – начальные значения давления и скорости топлива в магистрали, F и W – прямая и обратная волны давления.

В корпусе форсунки выделены характерные объемы и сечения, в которых определяется изменение давления топлива: 1. Объем кармана распылителя; 2. Сечение на входе в форсунку; 3. Объем в полости мультипликатора запираания; 4. Сечение в районе разветвления каналов высокого давления в корпусе форсунки; 5. Объем за запирающим конусом иглы.

Граничные условия для каждого из перечисленных сечений и объемов определяются исходя из соответствующих уравнений объемных балансов и действующих сил с учетом сжимаемости топлива и упругости подвижных элементов. Например, для полости мультипликатора:

$$\begin{aligned} \frac{dp_1}{dt} &= \frac{1}{\alpha_{сж} V_1} \times \\ &\times \left[(p'_2 - p_1) \mu_2 f_2 \sqrt{\frac{2}{\rho |p'_2 - p_1|}} - \mu_{эк} \sqrt{\frac{2}{\rho}} (p_1 - p_0) + f_1 \frac{dx_T}{dt} \right] \\ \frac{dx_T}{dt} &= \frac{dx}{dt} + \frac{d(\Delta l)}{dt} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 x}{dt^2} &= \frac{1}{m} \times \\ &\times \left[p_{2к} (f_u - f_c) + p_0 (f_1 - f_u) + p_c f_c - p_1 f_1 - K_{np} (x_{np} + x) \right] \end{aligned}$$

Здесь: $\alpha_{сж}$ – коэффициент сжимаемости топлива, x – перемещение иглы, dx_T/dt – скорость торца мультипликатора запираания, dx/dt – скорость иглы, $d(\Delta l)/dt$ – скорость изменения длины подвижных час-

тей форсунки – иглы и штанги – за счет упругости; p_2 – давление в полостях форсунки, p_0 – давление в дренажной магистрали, $\mu_2 f_2$ – эффективное проходное сечение дроссельного отверстия; $\mu f_{\text{ЭКВ}}$ – эквивалентное эффективное проходное сечение клапана, d_1 – диаметр мультипликатора запираания, V_1 – объем

полости, $K_{\text{пр}}$ – жесткость пружины форсунки, $x_{\text{пр}}$ – предварительная деформация пружины форсунки, m – масса иглы.

Математическая модель в виде структурной схемы из элементарных блоков Simulink представлена на рис. 2.

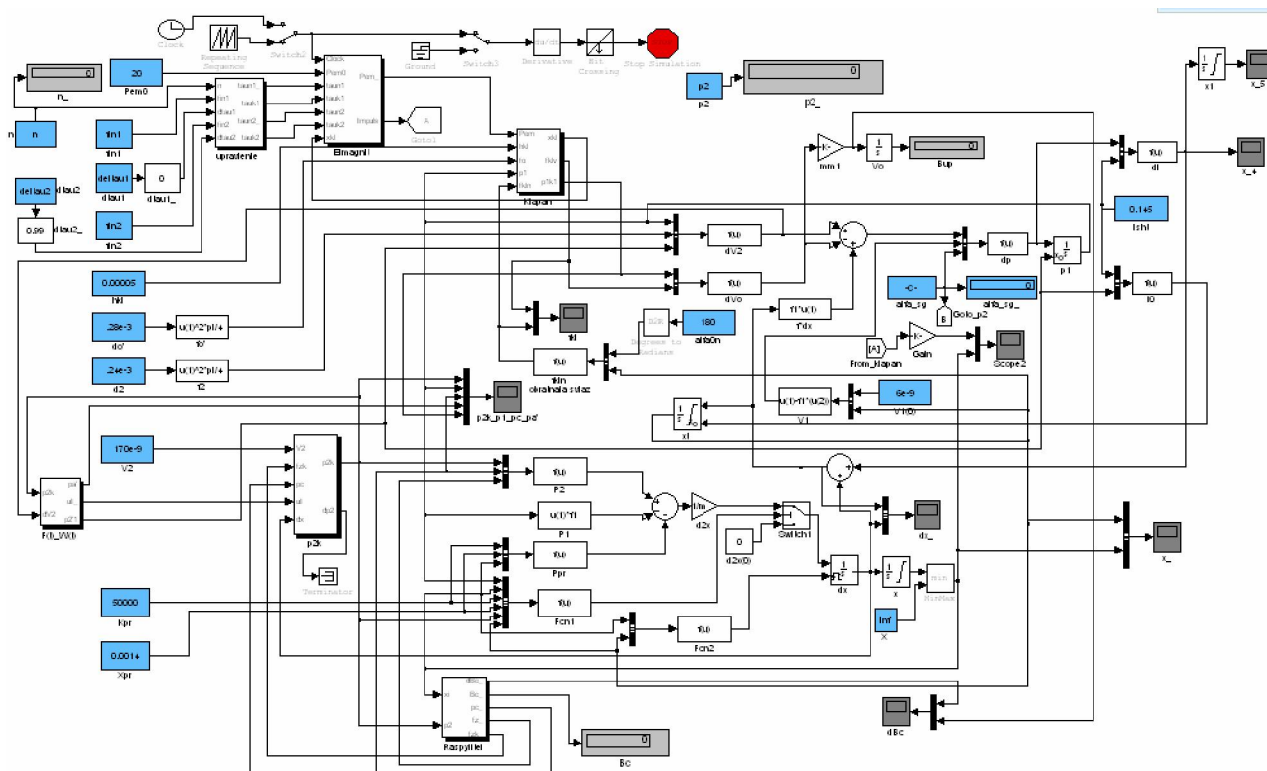


Рис.2. Математическая модель электрогидравлической форсунки

Система дифференциальных уравнений решается методом Рунге-Кутты 4-го порядка. Шаг интегрирования – переменный, максимальный шаг – 0,000005 с.

Идентификация математической модели заключалась в уточнении коэффициентов эффективного проходного сечения в клапане, запирающем конусе, распыливающих отверстиях, значения которых предварительно были выбраны в соответствии с рекомендациями, изложенными в [8]. Результаты идентификации, представляющие собой сопоставление расчетных и экспериментальных данных зависимости расхода топлива через форсунку от времени ее открытия приведены на рис. 3.

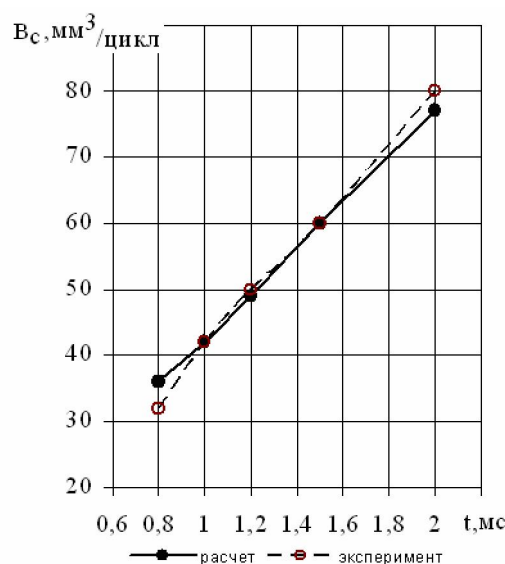


Рис. 3. Сравнение расчетных и экспериментальных данных

С использованием описанной математической модели выполнен расчет, моделирующий работу электрогидравлической форсунки разработанной в КП «ХКБД» (г. Харьков). Расчет выполнен для режима работы дизеля с максимальным давлением топлива в аккумуляторе 100 МПа. Результаты представлены на рис. 4-6. Время счета для приведенного примера составило 6 с (Celeron-2,5 ГГц, ОЗУ 512 Мб). Рассчитанная величина цикловой подачи: предварительная – 7,7 мм³/цикл, основная – 44,5 мм³/цикл. Величина управляющей подачи: 18,2 мм³/цикл.

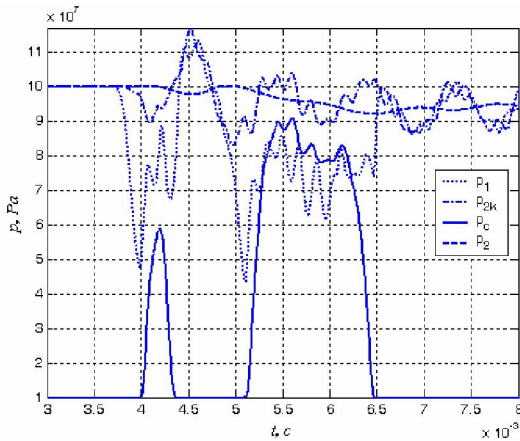


Рис. 4. Результаты моделирования: изменение давления в различных полостях форсунки

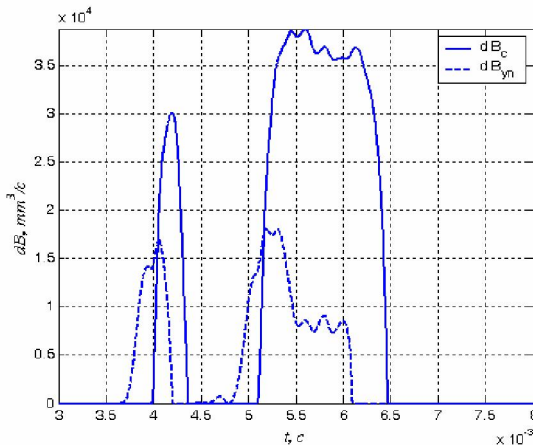


Рис. 5. Результаты моделирования: дифференциальные характеристики впрыскивания и расхода управляющего топлива

Выводы. Разработанная математическая модель электрогидравлической форсунки аккумуляторной топливной системы Common Rail позволяет:

- производить проектирование электрогидравлической форсунки,

ской форсунки,

- изучать влияние конструктивных параметров форсунки на процесс впрыскивания топлива,
- изучать влияние физических свойств топлива на работу топливной системы,
- проводить расчетную адаптацию топливной системы к проектируемому двигателю,
- разрабатывать алгоритмы для электронного блока системы автоматического управления дизелем.

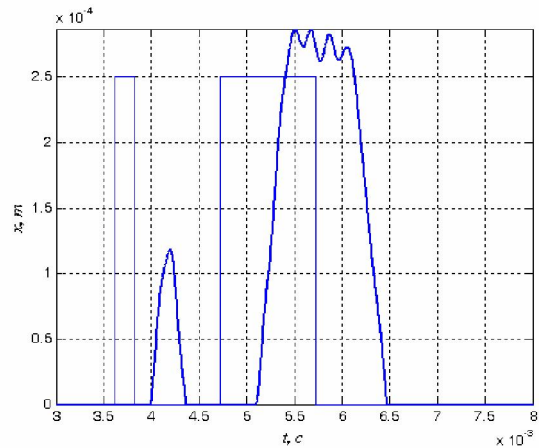


Рис. 6. Результаты моделирования: управляющий сигнал на электромагните и ход иглы форсунки

Список литературы:

1. Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. Топливная аппаратура и системы управления дизелей: Учебник для ВУЗов. – М.: Легион-Автодата, 2004. – 344 с. 2. Robert Bosch GmbH, Dieselmotor-Management, 3. vollständige überarbeitete und erweiterte Auflage, 2002. – S. 443. 3. Hummel K., Böcking F., Groß J., Stein J.-O., Dohle U. 3. Generation Pkw-Common-Rail von Bosch mit Piezo-Inline-Injektoren // MTZ: Motortechnische Zeitschrift. – 2004. – 65. – № 3. – S. 180-189. 4. Egger K., Warga J., Klügl W. Neues Common-Rail-Einspritzsystem mit Piezo-Aktorik für Pkw-Dieselmotoren // MTZ: Motortechnische Zeitschrift. – 2002. – 63. – № 9. – S. 696-704. 5. Stegemann J., Meyer S., Rölle T., G.P. Merker Einspritzsystem für eine vollvariable Verlaufsformung // MTZ: Motortechnische Zeitschrift. – 2004. – 65. – № 2. – S. 114-121. 6. Bauder R., Die Zukunft der Dieselmotoren-Technologie // MTZ: Motortechnische Zeitschrift. – 1998. – 59. – № 7/8. – S. 11-18. 7. Системы управления дизельными двигателями. Перевод с немецкого. Первое русское издание. – М.: ЗАО "КЖИ" За рулем", 2004. – 480 с. 8. Топливная аппаратура дизелей: Справочник/ Ю.Я.Фомин, Г.В.Никонов, В.Г.Ивановский. – М.: Машиностроение, 1982. – 168 с.