

УДК 621.43.052

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОННОГО ВПРЫСКИВАНИЯ БЕНЗИНА В ДВУХТАКТНОМ ДВИГАТЕЛЕ

Е.С. Грайворонский, аспирант,
А.Н. Врублевский, профессор, д.т.н., ХНАДУ

Аннотация. Представлены основные положения разработанной модели процессов, происходящих в топливоподающей системе с электронным управлением двухтактного двигателя с принудительным воспламенением. Приведены результаты расчёта процесса топливоподачи при условии установки инжектора во впускной системе.

Ключевые слова: двухтактный двигатель, топливная система, электромеханический инжектор.

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЕЛЕКТРОННОГО ВПОРСКУВАННЯ БЕНЗИНУ У ДВОТАКТНОМУ ДВИГУНІ

Є.С. Грайворонський, аспірант,
О.М. Врублевський, професор, д.т.н., ХНАДУ

Анотація. Представлено основні положення розробленої моделі процесів, що відбуваються у паливоподавальній системі з електронним керуванням двотактного двигуна з примусовим запаленням. Приведено результати розрахунку процесу паливоподачі за умов розміщення інжектора у впускній системі.

Ключові слова: двотактний двигун, паливна система, електромеханічний інжектор.

MODELING OF ELECTRONIC GASOLINE INJECTION PROCESSES IN TWO STROKE ENGINE

Y. Hraivoronskyi, postgraduate,
A. Vrublevskyi, Professor, Doctor of Technical Science, KhNAHU

Abstract. Basic provision of the processes developed mode, occurring in ignition fuel system with electronically controlled two stroke engine with positive ignition are given. Fuel injection process' calculation results for the case of placing fuel injector into intake system presented.

Key words: two stroke engine, fuel system, electromechanical injector.

Введение

При внедрении в двухтактном двигателе с принудительным воспламенением электронного управления в первую очередь необходимо разработать систему подачи топлива (рис. 1), включающую исполнительные устройства – форсунки. Такие устройства могут обеспечивать как непосредственно подачу топлива в цилиндр [1, 2], так и быть установлены во впускном трубопроводе [2].

Анализ публикаций

В двигателях с воспламенением от сжатия для подачи топлива наибольшее распространение получили форсунки с электромагнитным приводом запирающего клапана [1, 2]. В отличие от дизельных электрогидравлических форсунок, где электромагнит обеспечивает перемещение клапана управления, в форсунке (рис. 2) силы, развиваемой электромагнитом 6, достаточно для прямого воздействия на запирающий клапан – иглу 4.

Такие форсунки называют электромеханическими (ЭМФ) [3].

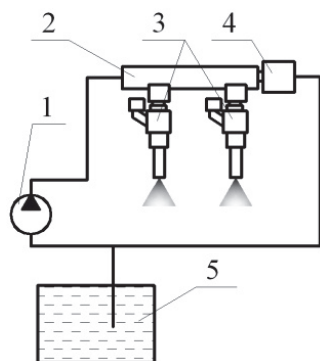


Рис. 1. Схема топливной системы для подачи бензина: 1 – топливный насос; 2 – рампа; 3 – форсунки; 4 – регулятор давления; 5 – топливный бак с топливоподкачивающим насосом и фильтром

Для определения конструктивных и регулировочных параметров форсунки и других элементов топливной системы, а также характеристики топливоподачи необходимо располагать математической моделью процессов, происходящих в элементах системы.

Трудностью применения серийно выпускаемых для подачи бензина форсунок в двухтактном двигателе является необходимость сокращения длительности их срабатывания. В таком случае целесообразно использовать форсунки (рис. 2), обеспечивающие подачу бензина под высоким давлением как в цилиндр, так и во впускной трубопровод. По литературным данным [2], такие форсунки обеспечивают подачу цикловой порции топлива за время 5 мс и менее.

Особенностью работы форсунки является задержка открытия клапана относительно начала подачи напряжения на клеммы катушки электромагнита, превышение длительности подачи топлива над длительностью управляющего импульса.

Перечисленные временные параметры необходимо определить на начальном этапе выбора конструкции с помощью математического моделирования. Это позволит создать эффективную систему управления процессом топливоподачи.

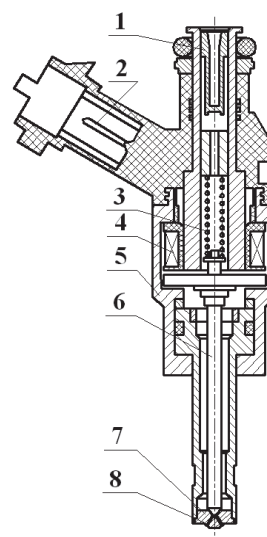


Рис. 2. Конструкция форсунки: 1 – впускной канал с фильтром тонкой очистки; 2 – электрический разъем; 3 – пружина; 4 – электромагнит; 5 – корпус форсунки; 6 – игла; 7 – седло иглы; 8 – распыливающие отверстия

При отключении напряжения магнитная сила, притягивающая якорь, находящийся на игле 6, уменьшается и игла возвращается на седло возвратной пружиной. Таким образом, можно сделать вывод о том, что в ЭМФ подача топлива за единичный импульс является функцией возбуждающего электрического импульса шириной t , приложенного к соленоиду. Во многих случаях первичным параметром является время реакции катушки на импульс. На рис. 3 показано изменение положения иглы в период впрыскивания с проявлением характерных явлений, сопровождающих ее перемещение.

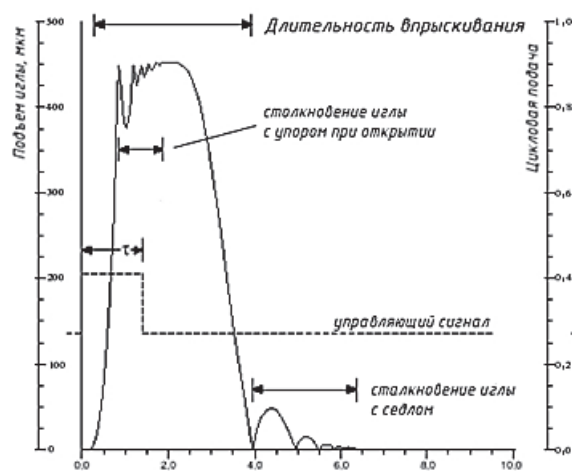


Рис. 3. Особенности перемещения иглы форсунки в процессе впрыскивания [5]

На рис. 3 показано, что динамическое поведение ЭМФ оказывает существенное влияние на процесс топливоподачи, и поэтому ввести в модель упрощения нецелесообразно. Значительное влияние на количество поданного топлива имеет отскок иглы от седла в конце возвратного движения. Также влияние на топливоподачу оказывают задержки открытия/закрытия иглы. При моделировании также следует учитывать явления, сопровождающие намагничивание-размагничивание привода ЭМФ.

Цель и постановка задачи

Исходя из вышесказанного, целью данного исследования является создание математической модели процессов, происходящих в топливной системе в период впрыскивания, что позволит выбрать конструктивные и регулировочные параметры ее отдельных компонентов, обеспечивающих подачу бензина в двухтактный двигатель. Для достижения данной цели необходимо провести анализ процесса топливоподачи, выявить основные явления, сопровождающие данный процесс, определить возможные допущения при моделировании, учесть в модели не только гидродинамическую составляющую, но и работу привода электромеханического инжектора.

Математическая модель электромагнита

Проведенный анализ конструкции форсунки и принцип организации ее работы позволяют при составлении модели процессов, происходящих в электромагните, использовать апробированные зависимости, полученные в [6].

Уравнение баланса мощностей для электрической цепи

$$U \cdot I = R \cdot I^2 - S \cdot \frac{B^2}{\mu_0} \cdot \frac{d\Delta l}{dt} + S \cdot l_k \cdot H_c \cdot \frac{dB}{dt} + \frac{d\Pi}{dt} + R_\phi \cdot I_n^2, \tag{1}$$

где $R \cdot I^2$ – потери мощности на активном сопротивлении цепи; $R_\phi \cdot I_n^2$ – потери мощности, связанные с индукционными токами в

якоре; $S \cdot \frac{B^2}{\mu_0} \cdot \frac{d\Delta l}{dt}$ – мощность, связанная с перемещением якоря; $S \cdot l_k \cdot H_c \cdot \frac{dB}{dt}$ – мощность, рассеиваемая в тепло при перемагничивании; $\frac{d\Pi}{dt}$ – мощность, связанная с изменением потенциальной энергии магнитного поля,

$$\frac{d\Pi}{dt} = S \cdot l_k \cdot (H - H_c) \cdot \frac{dB}{dt}. \tag{2}$$

Магнитодвижущая сила для петли магнитопровода длины l_k и двух зазоров между якорем и магнитопроводом суммарной длины $2 \cdot \Delta l$ подчиняется закону полного тока

$$I_M \cdot \omega = H \cdot l_k + \frac{2 \cdot \Delta l}{\mu_0} \cdot B, \tag{3}$$

где $I_M \cdot \omega = I \cdot \omega - I_u$ – намагничивающий ток.

С учетом указанных особенностей, формула для магнитодвижущей силы из [4] видоизменится и примет следующий вид:

$$I_M \cdot \omega = \frac{B}{\mu_0 \cdot \mu_{MD}} \cdot l_{\text{экв}} + H \cdot l_{\text{як}} + R_1(\Delta l_1) \cdot \frac{B}{\mu_0} + R_2(\Delta l_2) \cdot \frac{B}{\mu_0}, \tag{4}$$

где $R_1(\Delta l_1)$, $R_2(\Delta l_2)$ – потери, связанные с выпучиванием силовых линий, разностью площадей полюсов магнитопровода и якоря; B – магнитная индукция; $l_{\text{як}}$ – длина линии магнитной индукции по якорю; ω – число витков катушки; μ_0 – магнитная постоянная.

С учетом потока рассеивания уравнение (4) примет вид

$$I_M \cdot \omega = R_\Sigma \cdot \frac{B \cdot \sigma}{\mu_0}. \tag{5}$$

При определении намагничивающего тока учтены вихревые токи I_u , возникающие в якоре. Согласно закону электромагнитной индукции Фарадея-Максвелла изменение вихревого тока в электромагните описывается уравнением

$$I_{и} = \frac{S}{R_{\phi}} \cdot \frac{dB}{dt} \quad (6)$$

Из уравнений (4)–(6) можно получить равенство, связывающее изменение магнитной индукции с напряжением на обмотке соленоида

$$S \cdot \omega \cdot \frac{dB}{dt} = U - R \cdot I \quad (7)$$

После преобразований получим систему дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} [T_f + T_{и}] \cdot \frac{dI_M}{dt} = \frac{U}{R} - I_M - [T_f + T_{и}] \cdot \frac{2 \cdot B}{\mu_0 \cdot \omega} \cdot v_z \\ T_k \cdot \frac{d(U/R)}{dt} = -I \end{cases} \quad (8)$$

и четыре дополняющих систему (8) выражения

$$\begin{aligned} T_{и} &= \frac{\mu_0 \cdot S \cdot k \mu'}{R_{\phi}}, \quad T_f = \frac{\omega^2 \cdot R_{\phi}}{R} \cdot T_{и}, \\ H \cdot l_k + 2 \cdot \Delta l \cdot \frac{B}{\mu_0} &= I_M \cdot \omega, \\ I &= I_M + T_{и} \cdot \frac{dI_M}{dt} + T_{и} \cdot \frac{2 \cdot B}{\mu_0 \cdot \omega} \cdot v_{як}, \end{aligned}$$

где S – площадь активной поверхности полюса; ω – число витков катушки электромагнита; t – время; U – напряжение; R – сопротивление электрической цепи; I – управляющий (сетевой) ток; l_k – длина контура магнитной цепи; μ_0 – магнитная постоянная; R_{ϕ} – электрическое сопротивление якоря кольцевому току; $v_{як} = \frac{d\Delta l}{dt}$ – скорость перемещения якоря; T_f , T_k , $T_{и}$ – постоянные времени для электромагнита, конденсатора и вихревого тока соответственно; Δl – воздушный зазор электромагнита;

$$k\mu' = \frac{dB}{dH} \quad (9)$$

Для получения характеристик электромагнита потерями намагничивающей силы в якоре можно пренебречь. Тогда силу магнитного притяжения можно определить по формуле

$$F_{mag} = \frac{K_{вып} \cdot S_p \cdot B^2}{\mu_0}, \quad (10)$$

где $K_{вып}$ – коэффициент выпучивания для внешнего и внутреннего зазоров (определяется по методике, предложенной в [4]); B – магнитная индукция в якоре,

$$\begin{aligned} K_{вып} &= \frac{1}{2 \cdot (1 + k_v \cdot \Delta l)^2} + \frac{k_s}{2 \cdot (k_1 + k_2 \cdot \Delta l)^2}; \\ B &= \frac{I_M \cdot \omega \cdot \mu_0}{R_{\Sigma} \cdot \sigma} \end{aligned}$$

После достижения магнитного насыщения магнитная индукция, сила магнитного притяжения будут определяться по другим формулам

$$\begin{aligned} F_{mag}^{нас} &= \frac{S_p}{2 \cdot \mu_0} \cdot \frac{B_{нас}^2}{(1 + k_v \cdot \Delta l)^2} + \frac{S_p \cdot k_s}{2 \cdot \mu_0} \cdot \frac{B_{н}^2}{(k_1 + k_2 \cdot \Delta l)^2}, \\ B_{нас} &= \frac{[(I + I_{нас}) \cdot \omega] \cdot \mu_0}{R_{\Sigma} \cdot k_{рас}}, \end{aligned}$$

где $I_{нас}$ – сила тока после насыщения; $B_{н}$ – индукция насыщения воздушного зазора; B_{max} – максимальная магнитная индукция материала.

$$\begin{aligned} R_{\Sigma} &= \frac{\Delta l}{1 + k_v \cdot \Delta l} + \frac{k_s}{k_v} + 2 \cdot L(x), \quad I_{нас} = \frac{R_{\Sigma} \cdot k_{рас} \cdot B_{н}}{\omega \cdot \mu_0}, \\ B_{н} &= \left(1 + k_v \cdot \frac{\Delta l}{1 + k_v \cdot \Delta l} \right) \cdot \frac{B_{max}}{k_s}. \end{aligned}$$

В математической модели явление магнитного гистерезиса описывается уравнением

$$B = B_{max} \cdot th \left[\frac{H \pm H_c}{kH_c} \right], \quad (11)$$

где H_c – коэрцитивная сила, а величина kH_c определяется формой кривой намагничивания ферромагнитного материала.

Модель процесса течения топлива в топливной рампе и топливопроводах

В работе используется модель течения в трубопроводе с распределенными параметрами с

учетом трения. Известно, что если время, затраченное волной на перемещение трубопроводом, сопоставимо с длительностью топливоподачи, то волновые эффекты в жидкости влияют на процесс впрыскивания. Сжимаемость жидкости и расширение стенок трубопровода под давлением учитываются в использовании объемного модуля упругости, который возможно вычислить исходя из толщины стенок и модуля Юнга для данного материала.

Трение в трубопроводе при ламинарном потоке учитывается коэффициентом трения, основанным на числе Рейнольдса и относительной шероховатости стенок. Инерционность потока жидкости учитывается в модели трубопровода, разделенной на участки; к тому же производная расхода может быть скорректирована с учетом трения.

Входящими параметрами для данной модели трубопровода являются значения давления на одном конце и расхода жидкости на другом. В целом модель участка трубы разбивается на N внутренних участков со своими локальными значениями давления

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -\frac{B}{f} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x},$$

где f – площадь поперечного сечения трубопровода (топливной рампы), B – объемный модуль упругости, который для материала стенок вычисляется как

$$B(P) = V(P) \frac{dP}{dV(P)} \text{ или}$$

$$B(P) = \frac{1 + wP}{w},$$

где w – коэффициент объемного соответствия.

В итоге изменение давления определится из уравнения

$$\frac{dP}{dt} = \frac{B_{\text{эфф}} \cdot Q(P)}{V_{\text{эфф}}},$$

где Q – расход при текущем давлении, $B_{\text{эфф}}$ – эффективный модуль упругости, $V_{\text{эфф}}$ – эффективный объем участка трубопровода.

Расход в выходном сечении участка трубопровода и на внутренних узлах рассчитывается согласно формуле

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{S}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} - v \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{f_{\text{тр}} \cdot Q^2 \cdot \sin(Q)}{2 \cdot D \cdot S},$$

где ρ – плотность топлива, $f_{\text{тр}}$ – площадь поперечного сечения трубопровода, D – диаметр трубопровода, $f_{\text{тр}}$ – коэффициент трения.

Средняя скорость потока для внутренних участков вычисляется исходя из объемного расхода, осредненного по входу и выходу

$$v = \frac{v_{\text{вх}} - v_{\text{вых}}}{2} = -\frac{1}{2} \left(\frac{q}{S_{\text{вх}}} \cdot \frac{\rho_0}{\rho_{\text{вх}}} + \frac{q}{S_{\text{вых}}} \cdot \frac{\rho_0}{\rho_{\text{вых}}} \right).$$

Для определения граничных условий следует составить уравнения движения иглы ЭМФ, а также объемного баланса для ее распыляющего аппарата.

Таким образом, с учетом приведенных выше зависимостей, можно вывести общее уравнение движения клапана в инжекторе

$$\frac{d^2 x}{dt^2} m = f(\Delta p) + F_{\text{mag}} - z(\Delta x),$$

где $f(\Delta p)$ – подъемная сила, возникающая при перепаде давления, возникающем во время открытия клапана, F_{mag} – магнитодвижущая сила, $z(\Delta x)$ – сила, создаваемая возвратной пружиной, m – масса подвижных деталей инжектора.

Уравнение расхода для форсунки без учета сжимаемости топлива можно записать в виде

$$Q = \mu f \cdot S \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \Delta p},$$

где Q – расход топлива, μf – эффективное проходное сечение форсунки, S – проходное сечение сопла инжектора, ρ – плотность топлива, Δp – перепад давления в проходном сечении инжектора.

В результате расчета по предложенной модели получены характеристики процесса впрыскивания, которые позволят в дальнейшем выбрать и обосновать параметры формы управляющих сигналов для форсунок, конструктивные и регулировочные величины элементов топливной системы.

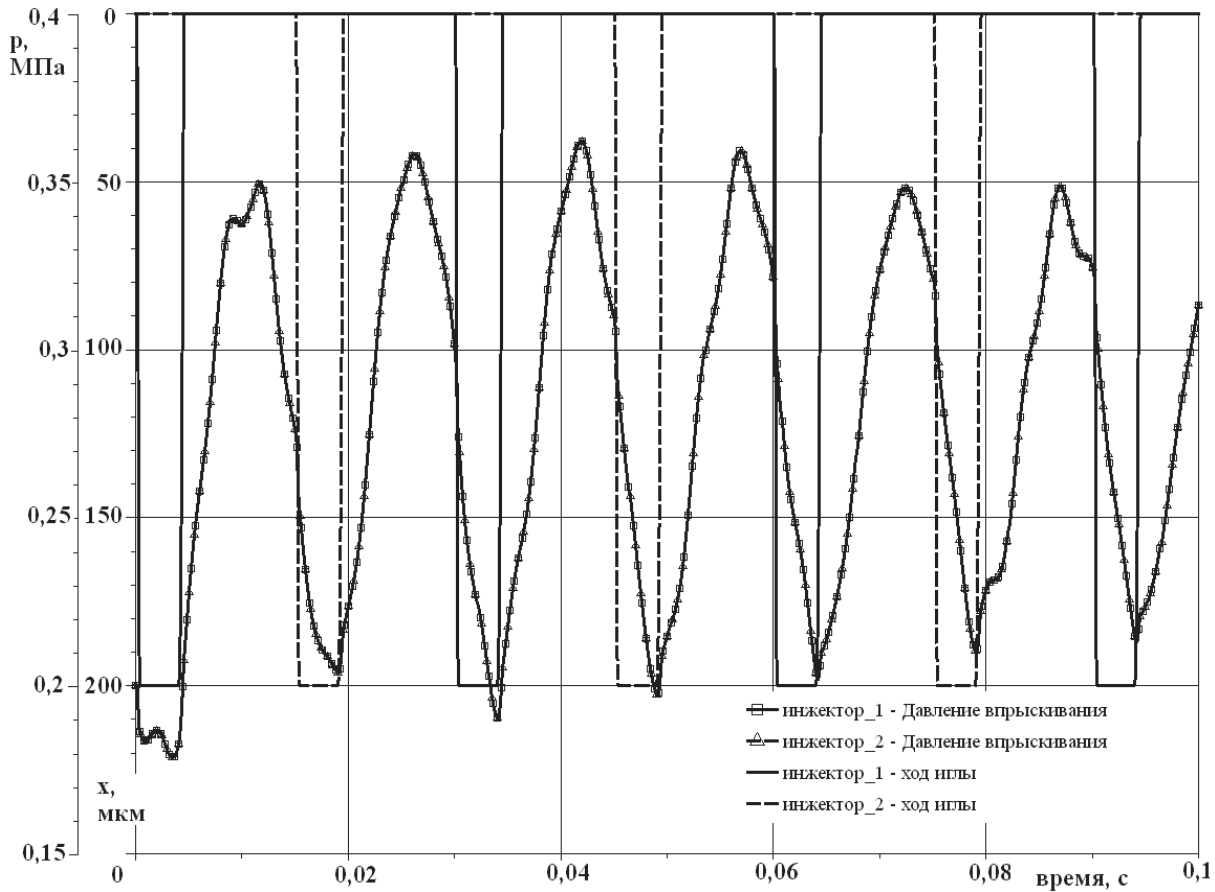


Рис. 4. Расчетные кривые хода иглы форсунки и давления впрыскивания при частоте вращения вала двигателя 2000 мин^{-1} и цикловой подаче 8 мм^3

Выводы

Рассмотрена схема системы подачи топлива, обеспечивающая различные стратегии впрыскивания бензина в двухтактном двигателе с электронным управлением. Предлагаемая система обеспечит подачу топлива как непосредственно в цилиндр, так и во впускную систему.

Предложено для обеспечения заданной частоты срабатывания форсунки для впрыскивания бензина в двухтактном двигателе применить алгоритм управления электромагнитом с форсированным предварительным импульсом и последующей фазой удержания.

Для определения магнитодвижущей силы составлена математическая модель быстродействующего электромагнита ЭМФ, для чего использована известная методика расчета магнитной цепи с помощью коэффициентов рассеивания.

При моделировании гидромеханической составляющей системы предлагается использовать апробированные модели перемещения иглы форсунки, а при составлении уравнений объемного баланса – не учитывать сжимаемость топлива. Задача течения топлива в трубопроводах и рампе основана на решении волнового уравнения.

Получены расчетные характеристики топливоподачи, которые позволят в дальнейшем выбрать и обосновать параметры формы управляющих сигналов для форсунок, конструктивные и регулировочные величины элементов топливной системы.

Литература

1. Автомобильный справочник; пер. с англ. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ЗАО «КЖИ «За рулем», 2004. – 992 с.
2. Системы управления бензиновыми двигателями; пер. с нем. С40 Первое русское издание. – М.: ЗАО «КЖИ «За рулем», 2005. – 432 с.

3. Пинский Ф.И. Микропроцессорные системы управления автомобильными двигателями внутреннего сгорания / Ф.И. Пинский, Р.И. Давтян, Б.Я. Черняк. – М.: Легион-Автодата, 2001. – 136 с.
4. Гордон А.В. Электромагниты постоянного тока / А.В. Гордон, А.Г. Сливинская. – М.: Энергоиздат, 1960. – 448 с.
5. A new model for Fast-acting electromagnetic fuel injector analysis and design / L. C. Passarini, M. Pinotti // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2003. – Jan./Mar. – Vol. 25, no.1.
6. Врублевский А.Н. Математическая модель быстродействующего электромагнита для топливной системы ДВС / А.Н. Врублевский, А.Л. Григорьев, А.М. Бовда // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. – 2006. – Вып. 19. – С. 138–143.

Рецензент: Ф.И. Абрамчук, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 13 сентября 2013 г.
