

УДК 533: 621.455

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ РЕГУЛИРУЕМОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ

**А.Б. Бачурин**  
**Е.В. Стрельников**  
**В.А. Целищев**

Уфимский государственный  
авиационный технический  
университет  
450000, Россия, г. Уфа,  
ул.К.Маркса, 12  
bachurinsasha@rambler.ru

Современная ракетная двигательная установка представляет собой динамическую систему с комплексом взаимосвязанных звеньев, обеспечивающих в процессе её функционирования на летательном аппарате получение заданных основных характеристик. Основной регулируемой величиной двигательной установки, выступающей в качестве объекта регулирования, является секундный массовый расход газов через сопло. Регулирующим воздействием является площадь управляемого дросселя в гидравлической системе регулирования площади поверхности горения твёрдого топлива за счёт слива жидкости из каналов заряда. Достигнутый в настоящее время уровень развития вычислительной техники позволяет моделировать поведение объекта и систем его управления. Это позволяет повысить качество проектирования и сократить сроки доводки гидроагрегатов.

**Ключевые слова:** Электрогидравлическая система; регулируемая двигательная установка; гидроавтоматика; гидроагрегат; переходные процессы; быстродействие; динамическая ошибка.

Целью математического моделирования гидроавтоматики регулируемой двигательной установки (РДУ) является получение системы уравнений, описывающих работу структурно-подобных установок, дальнейшее исследование которой на ЭВМ позволяет решать задачи анализа и синтеза динамических параметров системы автоматического регулирования.

Электрогидравлическая подсистема управления площадью поверхности горения состоит из камеры сгорания, заряда твёрдого топлива с выполненным в нем каналом и заполненным жидкостью, поршня, исполнительного элемента, представленного регулятором расхода и датчиком расхода жидкости из канала. На рисунке 1 представлена функциональная схема гидроавтоматики для регулирования площадью поверхности горения заряда твёрдого топлива в камере сгорания. В её состав входит электронный усилитель сигнала ошибки (УСО), измеритель электрического сигнала рассогласования ( $\Sigma$ ), электромеханический преобразователь (ЭМП), золотник клапана (ЗК), поршень в канале заряда (Поршень), датчик расхода в канале заряда (ДР) и объект регулирования (КС).

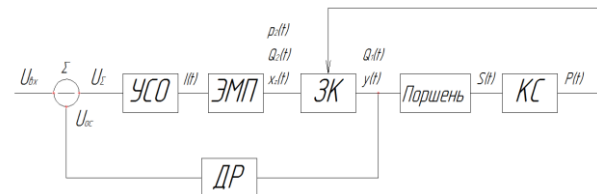


Рисунок 1. Блок – схема системы регулирования

В качестве исполнительного механизма применяется регулятор расхода, поддерживающий постоянство расхода независимо от изменения давления (рисунок 2). Конструктивно регулятор расхода состоит из последовательно включённых редукционного клапана (клапана перепада давлений) и управляемого электромагнитного дросселя. Расход жидкости через регулятор устанавливается дросселем, а постоянство перепада давления на дросселе – редукционным клапаном.

При увеличении расхода жидкости через дроссель увеличивается перепад давлений  $\Delta p = p_2 - p_3$ , который вызывает смещение запорно-регулирующего элемента клапана. Проходное сечение уменьшается, и при этом расход на выходе из регулятора будет уменьшен.

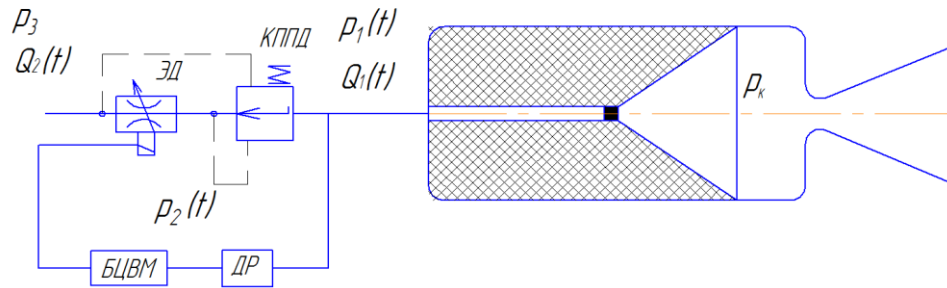


Рисунок 2. Принципиальная схема двухходового регулятора расхода

При составлении математической модели были сделаны следующие допущения:

- коэффициенты расхода дросселирующей щели клапана постоянного перепада давления и дросселя считаются постоянными;
- соблюдается условие неразрывности;
- модуль объёмной упругости рабочей жидкости и коэффициент вязкости считаются величинами постоянными, нерастворённый воздух в системе отсутствует;
- утечки рабочей жидкости через зазоры между трущимися поверхностями золотника и гильзы пренебрежимо малы;
- значения площадей входных отверстий сумматора потока считаются равными между собой;
- диаметры каналов в заряде твёрдого топлива считаются равными между собой и не изменяются в течение всего времени работы двигателя;
- гидравлические потери в подводящих гидролиниях пренебрежимо малы.

На основании принятых допущений математическая модель имеет следующий вид.

1. Уравнение электрической цепи электромеханического преобразователя, управляющего дросселем

$$(U_{\text{др}} - k_{\text{ос}} \cdot Q_{\text{к}}(t)) \cdot K_{\text{у}} = R_{\text{др}} \cdot i_{\text{др}}(t) + L_{\text{др}} \cdot \frac{di_{\text{др}}}{dt} + K_{\text{ПЭД}} \cdot \frac{dh(t)}{dt}, \quad (1)$$

где  $U_{\text{др}}$  – напряжение в обмотке управления электромагнита, В;  
 $R_{\text{др}}$  – активное сопротивление обмотки управления электромагнита, Ом;  
 $i_{\text{др}}(t)$  – зависимость силы тока в обмотке управления от времени, А;  
 $L_{\text{др}}$  – индуктивное сопротивление обмотки управления электромагнита, Гн;

$K_{\text{ПЭД}}$  – коэффициент противо-ЭДС в электрической цепи электромеханического преобразователя, В·с/м;

$h(t)$  – зависимость перемещения управляющей заслонки дросселя от времени, м.

2. Уравнение движения управляющей заслонки дросселя

$$m_{\text{др}} \cdot \frac{d^2 h(t)}{dt^2} = K_{\text{fid}} \cdot i_{\text{др}}(t) - b_{\text{вдр}} \cdot \frac{dh(t)}{dt} - c_{\text{др}} \cdot h(t), \quad (2)$$

где  $m_{\text{др}}$  – масса управляющей заслонки дросселя, кг;

$K_{\text{fid}}$  – коэффициент силы тока в электрической цепи электромеханического преобразователя, Н/А;

$b_{\text{вдр}}$  – коэффициент вязкого трения в дросселе, Н·с/м;

$c_{\text{др}}$  – коэффициент жёсткости пружины в дросселе, Н/м.

3. Уравнение движения золотника клапана постоянного перепада давления

$$m_{\text{к}} \cdot \frac{d^2 x_{\text{к}}(t)}{dt^2} = A_1 \cdot (p_2(t) - p_3) - b_{\text{вк}} \cdot \frac{dx_{\text{к}}(t)}{dt} - c_{\text{к}} \cdot x_{\text{к}}(t), \quad (3)$$

где  $m_{\text{к}}$  – масса золотника клапана постоянного перепада давления, кг;

$x_{\text{к}}(t)$  – зависимость перемещения золотника клапана постоянного перепада давления от времени, м;

$A_1$  – площадь торцевой поверхности клапана постоянного перепада давления, м<sup>2</sup>;

$p_3$  – зависимость давления на выходе из дросселя от времени, Па;

$b_{\text{вк}}$  – коэффициент вязкого трения золотника в клапане постоянного перепада давления, Н·с/м;

$c_{\text{к}}$  – коэффициент жёсткости пружины в клапане постоянного перепада давления, Н/м.

4. Уравнение баланса расхода через регулятор расхода

$$\mu_{\kappa} \cdot b_{\kappa} \cdot x_{\kappa}(t) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (p_1(t) - p_2(t))}{\rho_0}} - \mu_{\text{др}} \cdot b_{\text{др}} \cdot h(t) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (p_2(t) - p_3)}{\rho_0}} = \quad (4)$$

$$= \frac{V_{\kappa 1}}{2 \cdot E} \cdot \frac{dp_2(t)}{dt} + A_1 \cdot \frac{dx_{\kappa}(t)}{dt},$$

где  $N$  – количество каналов в заряде твёрдого топлива;

$\mu_{\kappa}$  – коэффициент расхода дросселирующей щели клапана постоянного перепада давления;

$b_{\kappa}$  – ширина щели золотника клапана постоянного перепада давления, м;

$V_{\kappa 1}$  – объём верхней полости клапана постоянного перепада давления, м<sup>3</sup>;

$E$  – приведённый модуль объёмной упругости рабочей жидкости, Па.

$\mu_{\text{др}}$  – коэффициенты расхода дросселя;

$b_{\text{др}}$  – ширина щели дросселя, м;

$V_{\kappa 2}$  – объём нижней полости клапана постоянного перепада давления, м<sup>3</sup>.

Динамика процессов в камере сгорания РДТТ при изменении площади поверхности горения описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} (U_{\text{др}} - k_{\text{ос}} \cdot Q_{\kappa}(t)) \cdot K_y &= R_{\text{др}} \cdot i_{\text{др}}(t) + L_{\text{др}} \cdot \frac{di_{\text{др}}}{dt} + K_{\text{ПЭД}} \cdot \frac{dh(t)}{dt}, \\ m_{\text{др}} \cdot \frac{d^2 h(t)}{dt^2} &= K_{\text{фид}} \cdot i_{\text{др}}(t) - b_{\text{вдр}} \cdot \frac{dh(t)}{dt} - c_{\text{др}} \cdot h(t), \\ m_{\kappa} \cdot \frac{d^2 x_{\kappa}(t)}{dt^2} &= A_1 \cdot (p_2(t) - p_3) - b_{\text{вк}} \cdot \frac{dx_{\kappa}(t)}{dt} - c_{\kappa} \cdot x_{\kappa}(t), \\ \mu_{\kappa} \cdot b_{\kappa} \cdot x_{\kappa}(t) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (P(t) - p_2(t))}{\rho_0}} - \mu_{\text{др}} \cdot b_{\text{др}} \cdot h(t) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (p_2(t) - p_3)}{\rho_0}} &= \quad (5) \\ &= \frac{V_{\kappa 1}}{2 \cdot E} \cdot \frac{dp_2(t)}{dt} + A_1 \cdot \frac{dx_{\kappa}(t)}{dt}, \\ \frac{dP(t)}{dt} &= \frac{1}{V_{\kappa}(t)} (\gamma RT(t) \chi_{\kappa} S(t) \rho_s u(t) - \gamma \sqrt{RT(t)} \mu_c A_n (F - f(y(t)) P(t) - P(t) S(t) u(t)), \\ u(t) &= u_1 P^{\nu}(t), \quad P(t) = \rho RT(t), \quad \frac{dV_{\kappa}}{dt} = SU(t). \end{aligned} \right.$$

Численное решение системы (5) проводилось на ЭВМ методом Рунге-Кутты-Фальберга 4-5 порядка с помощью системы аналитических вычислений *Maple*.

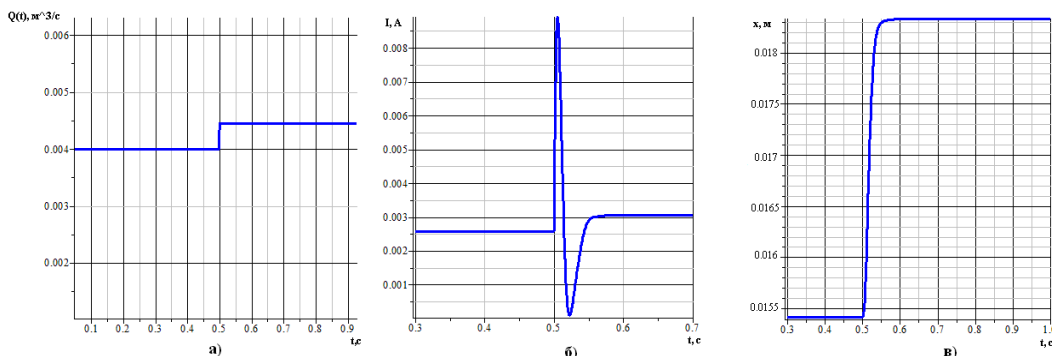


Рисунок 3. Графики переходных процессов в электрогидравлической системе управления:

а) программа управления расходом жидкости через регулятор расхода;

б) сигнал управления подаваемый на дроссельную заслонку регулятора расхода;

в) перемещение дроссельной заслонки

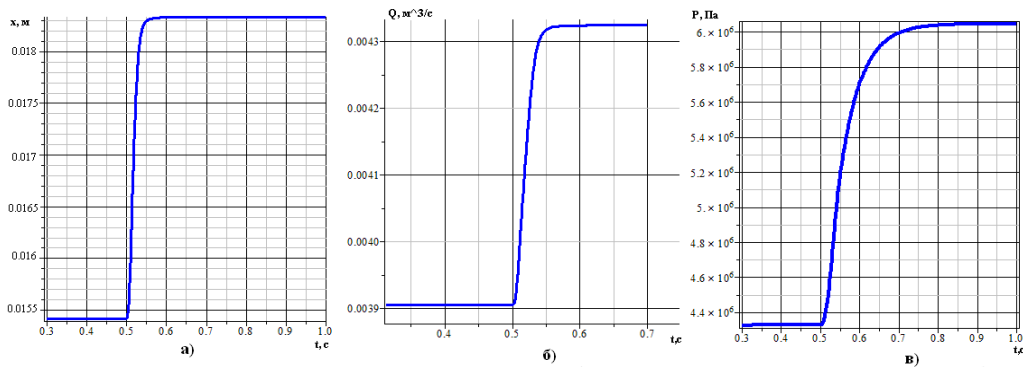


Рисунок 4. Графики переходных процессов в электрогидравлической системе управления:  
 а) перемещение дроссельной заслонки; б) изменение расхода через регулятор расхода;  
 в) изменение давления в камере сгорания

На рисунках 3 и 4 представлены графики переходных процессов в подсистеме регулирования площади поверхности горения, полученные при решении системы математических уравнений (5). В момент времени равный 0,5 с, в соответствии с заданной программой управления, подаётся управляющий сигнал на электромеханический преобразователь регулятора расхода, который перемещает золотник клапана. В результате увеличивается площадь проходного сечения дросселя и, соответственно, увеличивается расход жидкости из канала заряда твердого топлива, увеличивая при этом площадь поверхности горения. Давление в двигателе при этом выходит на новый режим.

На рисунке 5 показано влияние инерционности исполнительного механизма на рост давления в камере сгорания при увеличении площади проходного сечения дросселя.

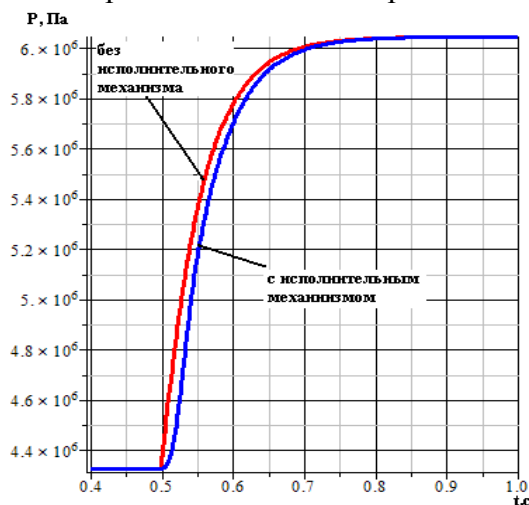


Рисунок 5. Сравнение переходного процесса изменения давления в камере сгорания с исполнительным механизмом и без него

Перемещение клапана золотника занимает определённое время, что приводит к значительному запаздыванию переходного процесса, в отличие от модели без исполнительного механизма. Таким образом, при моделировании управляющего воздействия инерционность исполнительного механизма можно не учитывать.

На рисунках 6 и 7 показано, как система поддержания постоянного расхода слива жидкости из канала заряда обрабатывает возмущающее воздействие. В момент времени  $t = 0.5$  с ступенчато изменяется площадь критического сечения сопла, в результате чего происходит увеличение давления в камере сгорания. Поршень в канале заряда начинает двигаться с большей скоростью, увеличивая расход жидкости через регулятор расхода. Подсистема обрабатывает увеличение расхода уменьшением площади проходного сечения канала регулятора, после чего расход принимает заданное значение.

Применение контура регулирования слива жидкости из канала заряда РДУ ограничивается значительным увеличением заброса давления на переходном режиме, что вызывает увеличение динамической ошибки ракетного двигателя твёрдого топлива (РДТТ), упрочнение стенок камеры сгорания. Кроме того, на некоторых режимах работы установки фронт пламени может обогнать поршни, а скорость горения топлива во многом определяется давлением в камере.

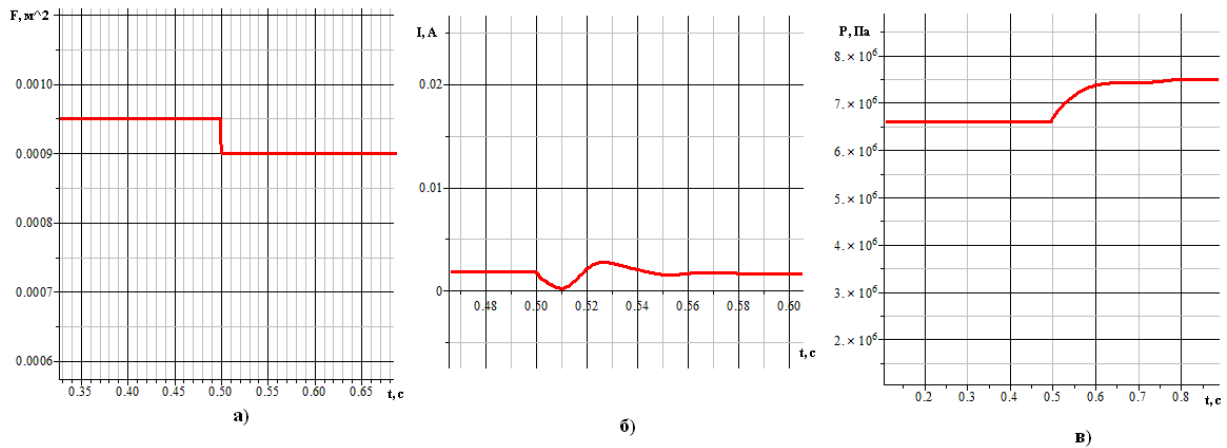


Рисунок 6. Графики переходных процессов в электрогидравлической системе управления:  
 а) изменение площади критического сечения сопла, б) управляющий сигнал по току,  
 в) изменение давления в системе на входе в регулятор расхода

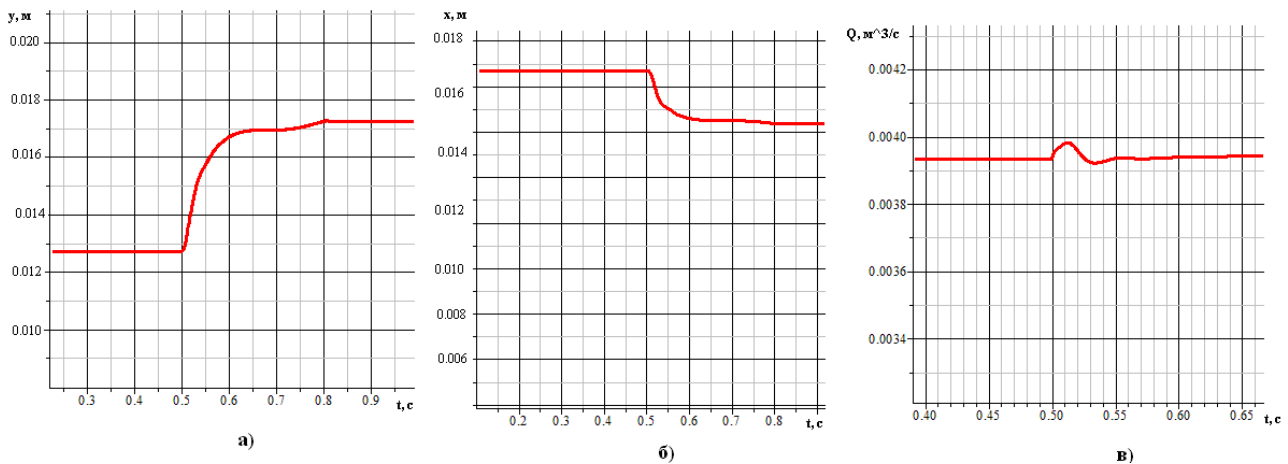


Рисунок 7. Графики переходных процессов в электрогидравлической системе управления:  
 а) перемещение пропорционального клапана; б) перемещение золотникового клапана;  
 в) изменение расхода на выходе из регулятор

Решена задача численного моделирования процессов в гидравлической системе РДУ с влияния устройства гидроавтоматики. Моделирование процессов в электрогидравлической системе управления РДУ позволяет разработчикам по заданным техническим требованиям и свойствам переходных процессов объекта управления на основе математического моделирования подбирать рациональные параметры. Моделирование рабочих процессов, основанное на решении системы дифференциальных уравнений в нелинейном виде, позволяет учитывать влияние различных нелинейностей, оказывающих существенное воздействие на свойства переходных процессов в гидроавтоматике.

#### Список использованных источников

- [1] Petrenko V.I., M. Sokolowski, A. Zykov, Lyanguzov S.V., Todoschenko A.I. V.L. Popov, Potapov B.F., Sevastiyarov V.V. Yarushin S.G. Upravliyemие energeticheskie ustanovki na tverdom toplive [Managed power plants for solid propellants] / Under total. Ed. M. Sokolowski and VI Petrenko.M.: Mechanical Engineering, 2003. 464.
- [2] Prisnyakov V.F. Dinamika raketnih dvigatelei tverdogo topliva [Dynamics of solid rocket motor fuel.] Textbook for vuzov.-M. Engineering, 1984, 248 p.
- [3] Tselishev V.A., Aref K.V., Mesropyan A.V., Telitsyn Y.S. Identifikaciy i adaptivnoe upravlenie struinimi gidravlichesкими mashinami [Identification and adaptive control of jet engines with hydraulic steering] / Acad MAI, Moscow, 2007. □ p.282.
- [4] Bachurin A.B., Strel'nikov E.V., Litvinov E.S., Tselishev V.A. Sistema avtomaticheskogo regulirovaniy davleniy v kamere sgoraniy [Automatic control system pressure in the combustion chamber SRBs] / Herald USATU, Ufa, 2013, Volume 17, № 3 (56) - P.26 - 33.

## MODELING OF ELECTRO-HYDRAULIC CONTROLLED PROPULSION SYSTEM

**A.B. Bachurin**  
**E.V. Strelnikov**  
**V.A. Tselishev**

Ufa State Aviation Technical  
University,  
Ufa,  
Ul. K. Marksa 12,  
Russia, 450000  
bachurinsasha@rambler.ru

*Modern rocket propulsion system is a dynamic system with a set of interconnected links. Modern controlled propulsion system, ensuring in the process of its operation on the aircraft receiving the given basic characteristics. Main propulsion controlled variable serving as controlled object is second mass flow of gases through the nozzle. Regulating influence area is managed through hydraulic adjusting the surface area of solid fuel combustion by draining the channel charge. Currently achieved level of development of computer technology allows to simulate the behavior of the object and its management systems. This helps improve the design quality and reduce debugging time hydroelectric generators.*

**Key words:** *Electro-hydraulic system; controlled propulsion system; hydraulics; hydro unit; transitional processes; quick-acting; dynamic inaccuracy*