

УДК 533: 621.455

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ГАШЕНИЕМ И ПОВТОРНЫМ ЗАПУСКОМ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ ТВЁРДОГО ТОПЛИВА

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

Уфимский государственный
авиационный технический
университет
450000, Россия, г. Уфа,
ул. К.Маркса, 12

e_strelnikov@mail.ru

В рамках решения современной проблемы серийного использования твёрдотопливных двигательных установок в космической отрасли, связанной с ограниченными возможностями глубокого регулирования модуля тяги и многократного включения-выключения установки, предлагается внедрение комбинированной системы управления. В статье приводится схема регулируемой ракетной двигательной установки, оснащённой трёхконтурной электрогидравлической системой управления, и описываются способы регулирования, заложенные в её основу. Выполнен анализ переходных процессов в ракетном двигателе твёрдого топлива при отдельном и комбинированном использовании подсистем регулирования, отвечающих за гашение и подготовку двигателя к повторному запуску.

Ключевые слова: ракетный двигатель твёрдого топлива; хладагент; комбинированная система управления гашением; динамическая модель; рулевая машина; регулятор расхода; тяга.

Введение

Как показывает опыт прошлых лет совершенствование одного из приоритетных направлений, а именно развитие космической отрасли, неразрывно связано с внедрением ракетных двигательных установок нового поколения. В рамках ситуации, сложившейся на сегодняшний день, наиболее перспективными являются регулируемые ракетные двигательные установки на твёрдом топливе. Однако массовое внедрение данного типа двигателей ограничивается рядом недостатков, имеющих у этих ракетных систем. К ним относятся:

- 1) сложность обеспечения необходимой глубины регулирования модуля тяги (50:1);
- 2) неудовлетворительные динамические характеристики процесса регулирования (быстродействие, точность, качество переходных процессов);
- 3) сложность конструктивного исполнения;
- 4) вероятность повторного несанкционированного воспламенения заряда, вызванная неоптимальностью режима впрыска хладагента в камеру сгорания для двигателей многократного включения [1].

Для решения имеющихся проблем и устранения выявленных недостатков, во многих

государствах с каждым годом укрепляется рост консолидации научно-образовательных центров (НОЦ) и предприятий, где главной целью ставится исследование и глубокий анализ работы высокоточных систем автоматического регулирования (САР) со встроенными средствами интеллектуальной гидроавтоматики, только благодаря которым можно достичь желаемого результата.

Именно комбинированные системы управления со встроенными гидроагрегатами, в качестве исполнительных механизмов, позволят обеспечить необходимый диапазон регулирования тяги двигательной установки, повысив быстродействие и качество регулирования [2].

Нахождение рациональных значений параметров регуляторов, и прежде всего их исполнительных механизмов, осуществляемое посредством исследования статических и динамических характеристик, как при отдельной, так и при совместной работе, а также при влиянии на внутриваллистические характеристики объекта регулирования, является неотъемлемой частью этапов разработки любой современной системы регулирования ракетной двигательной установки (РДУ).

Большой интерес вызывает возможность качественного улучшения динамических характеристик систем автоматического регулирования конкретных двигательных установок, при внедрении в них серийных исполнительных устройств.

Благодаря проводимым исследованиям разработчики уже сейчас отказываются от некоторых видов огневых стендовых испытаний, тем самым обеспечивая снижение временных и финансовых затрат при разработке и последующей доводке систем управления, значительно увеличивая уровень и обоснованность конструкторских решений, а, следовательно, и энергомассовое совершенство РДУ.

Определившись, таким образом, со сложившейся на данный момент проблемой и возможным вариантом её решения, а именно внедрением комбинированной системы управления, необходимо проанализировать какие способы регулирования могут быть заложены в её основу.

В решении данного вопроса можно отметить большой вклад многих отечественных предприятий и институтов. Сюда можно отнести: АО «ГРЦ им. академика В. П. Макеева» (Миасс), ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша» (Москва), НПО «Искра» (Пермь), Пермск. Политех. (Пермь), ФГАОУ ВО «СГАУ им. академика С.П. Королёва» (Самара), ФГБОУ ВПО «ИжГТУ» (Ижевск), ФГБОУ ВПО «КГТУ им. Туполева» (Казань), ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н. Э. Баумана» (Москва), ФГБОУ ВПО «УГАТУ» (Уфа), ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (Челябинск), ФГУП «Моск. инст. теплотехники» (Москва), ФГУП «НПО автоматики» (Екатеринбург), ФНПЦ «Алтай» (Бийск), ФЦДТ «Союз» (Дзержинский).

Благодаря исследованиям, проведённым в перечисленных выше организациях, и разработкам схем и опытных образцов регулируемых двигательных установок со встроенными системами управления, были выявлены основные преимущества и недостатки каждого из способов регулирования.

Часть из способов регулирования сегодня не может быть реализована по причине конструктивной сложности, некоторые требуют чрезмерного увеличения массогабаритных характеристик РДУ, другие недостаточно эффективны.

Наиболее перспективными для дальнейшего применения показали себя способы изменения:

площади поверхности горения твёрдого топлива S , площади критического сечения сопла $F_{кр}$ и дополнительно вводимой в камеру сгорания массы хладагента m_f . Только при их комбинированном сочетании (S и $F_{кр}$; $F_{кр}$ и m_f) была достигнута наибольшая эффективность результатов.

На основании этого, в ФГБОУ ВПО «УГАТУ» была предложена схема регулируемого ракетного двигателя твёрдого топлива (РДТТ) с трёхконтурной электрогидравлической системой управления, сочетающей в себе все три данных способа регулирования (S , $F_{кр}$ и m_f) (рисунок 1) [3].

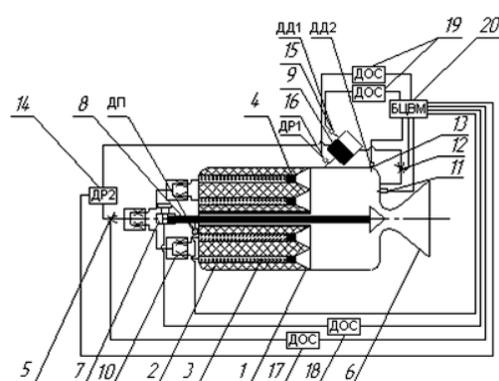


Рисунок 1. Схема ракетного двигателя твёрдого топлива многократного включения:

- 1 – камера сгорания; 2 – топливный заряд;
- 3 – каналы, заполненные хладагентом;
- 4 – поршни; 5 – регулятор расхода хладагента; 6 – сопло; 7 – исполнительный механизм;
- 8 – датчик перемещения; 9 – узел гидрогашения; 10 – делители потока; 11 – узел воспламенения; 12 – регулятор расхода продуктов сгорания;
- 13 – датчик давления ПС; 14 – датчик расхода; 15 – датчик давления жидкого хладагента;
- 16 – датчик расхода узла гидрогашения;
- 17–19 – датчики обратной связи;
- 20 – бортовая ЭВМ

В данной конструкции системы управления двигательной установкой, используются:

- подсистема слива рабочей жидкости из каналов в заряде твёрдого топлива (ТТ), позволяющая увеличивать тягу двигателя на величину, превышающую номинальное значение, более чем в 50 раз;
- подсистема поддержания постоянного давления, за счёт изменения площади

критического сечения сопла, позволяющая держать давление: а) либо на максимально допустимом уровне, способствующем сокращению времени переходного процесса; б) либо на минимально допустимом уровне, способствующем сокращению времени при мгновенном повторном воспламенении заряда;

- подсистема впрыска хладагента в камеру сгорания, позволяющая обеспечить мгновенное гашение заряда твёрдого топлива и замедлить процесс горения, либо его полностью остановить.

Исполнительными механизмами в подсистемах выступают струйная гидравлическая рулевая машина и регуляторы расхода (впрыска хладагента в камеру сгорания и слива жидкости из каналов заряда).

Однако, при описании физических процессов, происходящих в ходе работы данного регулируемого ракетного двигателя с тремя подсистемами управления и построении его математической модели, приходится сталкиваться со сложностью системных связей и закономерностей, заставляющих перейти от рассмотрения трёхконтурной системы в целом к более детальному исследованию контуров, отвечающих за работу двигательной установки

В рамках проводимой работы был выбран контур электрогидравлической системы управления, отвечающий за гашение заряда твёрдого топлива и подготовку двигательной установки к мгновенному повторному запуску. Этот контур включает в себя подсистемы изменения площади критического сечения сопла $F_{кр}$ и впрыска хладагента m_f в камеру сгорания.

Модель регулируемого РДТТ с подсистемой впрыска жидкого хладагента в камеру сгорания

Целью такого моделирования является получение системы уравнений, описывающих работу структурно-подобных РДУ, дальнейшее исследование которой на ЭВМ позволяет решать задачи анализа и синтеза динамических параметров САУ.

На рисунке 2 представлена схема подсистемы регулирования впрыска хладагента в камеру сгорания.

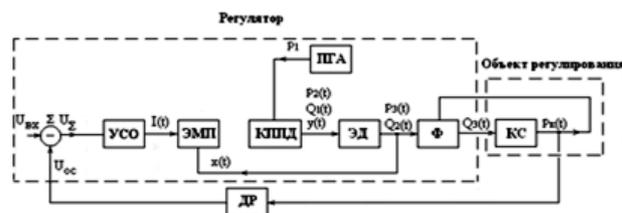


Рисунок 2. Функциональная схема подсистемы регулирования расхода жидкого хладагента

В её состав входит пневмогидроаккумулятор (ПГА), измеритель электрического сигнала рассогласования (Σ), электронный усилитель сигнала ошибки (УСО), электромеханический преобразователь (ЭМП), электромагнитный дроссель (ЭД), клапан постоянного перепада давления (КПД), форсунка (Ф), датчик расхода хладагента из ПГА (ДР) и объект регулирования – камера сгорания (КС).

Тип подачи хладагента в такой подсистеме – вытеснительный, осуществляемый посредством образования продуктов сгорания ТТ в ПГА. В качестве исполнительного механизма используется регулятор расхода (РР). Расход жидкости через РР устанавливается положением дросселя, а постоянство перепада давления на дросселе – редукционным клапаном.

Математическая модель подсистемы регулирования жидкого хладагента, в данном случае, включает в себя уравнения внутрикамерных процессов двигателя (объект регулирования) и уравнения РР, с подсоединённым ПГА и форсуночным блоком (регулятор) и выглядит следующим образом:

– уравнение электрической цепи ЭМП, управляющего дросселем

$$(U_{др} - k_{ос} Q_{др}(t)) K_y = R_{др} i_{др}(t) + L_{др} \frac{di_{др}(t)}{dt} + K_{пэ} \frac{dx(t)}{dt}; \quad (1)$$

– уравнение движения управляющей заслонки дросселя

$$m_{др} \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = K_{fid} i_{др}(t) - b_{вдр} \frac{dx(t)}{dt} - c_{др} x(t); \quad (2)$$

– уравнение движения золотника КПД

$$m_k \frac{d^2 y(t)}{dt^2} = A(p_2(t) - p_3(t)) - b_{vk} \frac{dy(t)}{dt} - c_k y(t); \quad (3)$$

– уравнение баланса расходов через РР

$$\mu_k b_k y(t) \sqrt{\frac{2(p_1(t) - p_2(t))}{\rho_{ж}}} - \mu_{др} b_{др} x(t) \sqrt{\frac{2(p_2(t) - p_3(t))}{\rho_{ж}}} = \frac{W_0}{2E} \frac{dp_2(t)}{dt} + A \frac{dy(t)}{dt}; \quad (4)$$

– уравнение баланса расходов через форсунки

$$\mu_{др} b_{др} x(t) \sqrt{\frac{2(p_2(t) - p_3(t))}{\rho_{ж}}} = \mu_{\phi} \frac{\pi d_{\phi}^2}{4} N \times \sqrt{\frac{2(p_3(t) - p_k(t))}{\rho_{ж}}} + \frac{W_0}{2E} \frac{dp_3(t)}{dt}; \quad (5)$$

– уравнение сохранения массы в камере сгорания при впрыске жидкого хладагента

$$\frac{V_{cb}}{RT_k(t)} \frac{d}{dt} p_k(t) = \rho_{\tau} S u \frac{RT_v}{RT_k(t)} - k \frac{\mu_c A(k) F_{кр}}{\sqrt{RT_k(t)}} p_k(t) - \frac{k-1}{RT_k(t)} H_x Y_x(t); \quad (6)$$

– уравнение сохранения энергии в камере сгорания при впрыске жидкого хладагента

$$\frac{p_k(t) V_{cb}}{(RT_k(t))^2} \frac{d(RT_k(t))}{dt} = Y(t) \left(\frac{\chi_k RT_v}{RT_k(t)} - 1 \right) - (k-1) \times \frac{\mu_c A(k) F_{кр}}{\sqrt{RT_k(t)}} p_k(t) - Y_x(t) - \frac{k-1}{RT_k(t)} H_x Y_x(t); \quad (7)$$

– уравнение изменения свободного объёма камеры сгорания;

$$\frac{dV_{cb}}{dt} = S u(t); \quad (8)$$

– уравнение состояния

$$p_k(t) = \rho_{\tau} RT_k(t); \quad (9)$$

– степенной закон горения твёрдого топлива

$$u = u_1 (p_k(t))^y, \quad (10)$$

где $U_{др}$ и $i_{др}(t)$ – напряжение (В) и сила тока (А) обмотки управления электромагнита ЭМП;

k_{oc} – коэффициент обратной связи;

$R_{др}$ и $L_{др}$ – активное (Ом) и индуктивное (Гн) сопротивление обмотки управления электромагнита;

$Q_k(t) = \mu_k b_k y(t) \sqrt{\frac{2(p_1(t) - p_2(t))}{\rho_{ж}}}$ – объёмный расход хладагента через КППД (m^3/c);

$Q_{др}(t) = \mu_{др} b_{др} x(t) \sqrt{\frac{2(p_2(t) - p_3(t))}{\rho_{ж}}}$ –

объёмный расход хладагента через ЭД (m^3/c);

$Q_{\phi}(t) = \mu_{\phi} \frac{\pi \cdot d_{\phi}^2}{4} N \sqrt{\frac{2(p_3(t) - p_k(t))}{\rho_{ж}}}$ –

объёмный расход хладагента через форсунки (m^3/c);

K_y – коэффициент усиления по напряжению;

$K_{пз}$ – коэффициент противо-ЭДС в ЭМП

(В·с/м);

$x(t)$ и $y(t)$ – перемещение управляющей заслонки ЭД и золотника КППД (м);

$m_{др}$ и m_k – масса заслонки ЭД и золотника КППД (кг);

K_{fid} – коэффициент силы тока в электрической цепи ЭМП (Н/А);

$b_{вдр}$ и b_{vk} – коэффициент вязкого трения заслонки ЭД и золотника КППД (Н·с/м);

$c_{др}$ и c_k – коэффициент жёсткости пружины ЭД и КППД (Н/м);

A и W_0 – площади торцевых поверхностей (m^2) и объём рабочей полости (m^3) КППД;

$p_2(t)$ и $p_3(t)$ – давление на входе и выходе из ЭД (Па);

μ_k и $\mu_{др}$ – коэффициенты расхода дросселирующей щели КППД и ЭД;

$b_{др}$ и b_k – ширина щели ЭД и золотника КППД (м);

$\rho_{ж}$ и E – плотность (кг/м^3) и модуль объёмной упругости хладагента (Па);

p_1 – давление на входе в КППД (Па);

$p_k(t)$ – давление в камере сгорания двигательной установки (Па).

На рисунках 3 и 4 представлены графики изменения сигнала управления ЭМП электромагнитного дросселя и перемещения его заслонки, полученные по результатам расчётов.

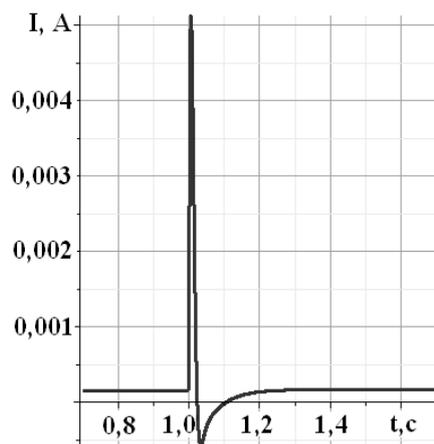


Рисунок 3. Сигнал управления ЭМП электромагнитного дросселя

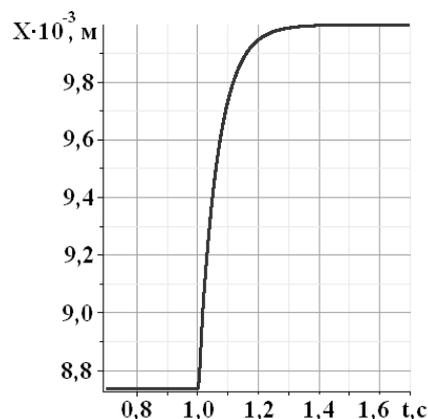


Рисунок 4. Перемещение заслонки электромагнитного дросселя

Для сравнения влияния исполнительного механизма на переходные процессы в камере сгорания на рисунке 5 представлен график изменения внутрикамерного давления с учётом модели исполнительного механизма (1) – (10) и без неё [4, 5].

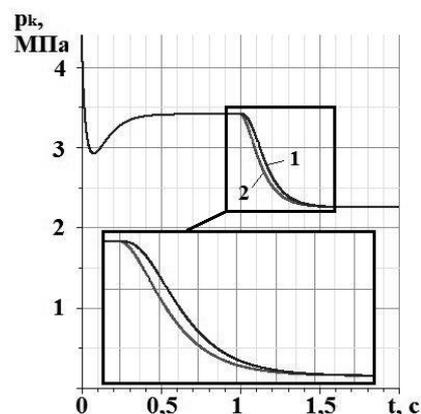


Рисунок 5. Сравнение переходных процессов: 1 – с учётом модели гидроагрегата; 2 – без неё

Согласно полученной сравнительной характеристике: при учёте модели регулятора расхода время переходного процесса увеличивается на 0,2 с, тем самым уменьшается быстродействие системы. Связано это с инерционностью исполнительного механизма.

Отсюда можно сделать вывод, что не учёт модели исполнительного механизма подсистемы впрыска хладагента в камеру сгорания РДТТ не позволяет достоверно оценить время переходного процесса при гашении.

Так как в подсистеме регулирования впрыска жидкого хладагента в камеру сгорания применяется регулятор расхода, необходимо было проверить, как он отрабатывает возмущающее воздействие, вызванное изменением давления в ПГА. На рисунке 6 представлен такой график.

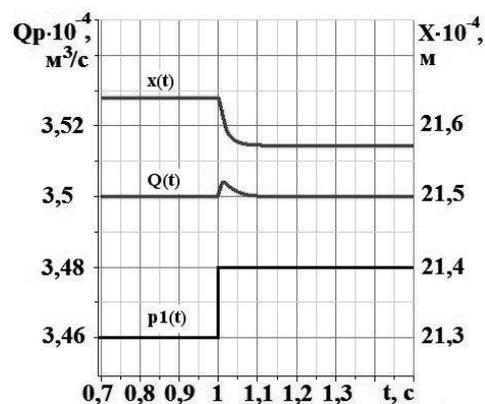


Рисунок 6. Работа системы поддержания расхода хладагента, впрыснутого в камеру

В момент времени $t = 1$ с ступенчато изменяем давление в камере

пневмогидроаккумулятора и видим, что расход хладагента увеличился. Для поддержания его на заданном уровне, система автоматически уменьшает перемещение заслонки электромагнитного дросселя, после чего расход понижается до заданного значения. Система полностью отрабатывает возмущающее воздействие.

Модель регулируемого РДТТ с подсистемой регулирования давления в камере сгорания

Регулирование давления в ракетной двигательной установке твёрдого топлива с изменяемой площадью критического сечения осуществляется с помощью рулевой машины (РМ), которая выполняет целый ряд функций: от поддержания постоянного давления в камере сгорания до его сброса при переходе с максимального уровня тяги на минимальный, и обратно [1].

На рисунке 7 представлена функциональная схема подсистемы регулирования давления в камере сгорания двигательной установки за счёт изменения площади критического сечения сопла $F_{кр}$.

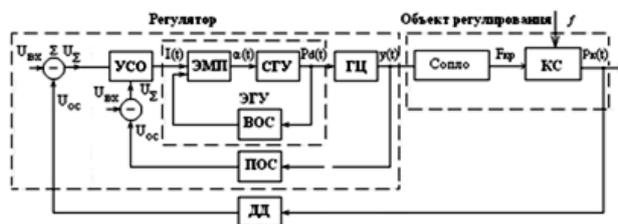


Рисунок 7. Функциональная схема подсистемы регулирования давления в камере сгорания РДУ

В её состав входит измеритель электрического сигнала рассогласования (Σ), электронный усилитель сигнала ошибки (УСО), электромеханический преобразователь сигнала (ЭМП), струйный гидроусилитель (СГУ), гидроцилиндр (ГЦ), датчик давления (ДД), потенциметрический датчик обратной связи по перемещению центрального тела (ПОС) и объект регулирования – камера сгорания (КС).

Схема регулятора состоит из 2-х контуров: основного, обусловленного наличием у ГЦ потенциметрической обратной связи (ПОС), и внутреннего, обусловленного наличием внутренней обратной связи (ВОС) между ЭМП и ГУ [6].

Математическая модель подсистемы регулирования давления $F_{кр}$ состоит из:

– уравнения электрической цепи ЭМП

$$R_{\text{ЭМП}} i(t) + L \frac{di(t)}{dt} + K_{\text{пэ}} \frac{d\alpha(t)}{dt} = K_y (U_{\text{вх}} - K_{\text{ос}} p_k(t)),$$

$$\text{где } K_{\text{ос}} = \frac{U_{\text{вх}}}{P_{\text{к max}}}; \tag{11}$$

– уравнение моментов

$$J \frac{d^2 \alpha(t)}{dt^2} = K_{\text{ми}} i(t) - K_{\text{м\alpha}} \alpha(t) - b_m \frac{d\alpha(t)}{dt} - C_{\text{ЭМП}} \alpha(t); \tag{12}$$

– уравнения движения поршня (штока) гидроцилиндра

$$m \frac{d^2 y(t)}{dt^2} = A p_d(t) - b_{\text{вн}} \frac{dy(t)}{dt} - F_{\text{тр}} - C_{\text{п}} y(t); \tag{13}$$

– уравнения баланса расходов

$$\left(\frac{W_0 + A \cdot y(t)}{E} + C_{\text{н}} \right) \frac{dp_d(t)}{dt} + A \frac{dy(t)}{dt} = \begin{cases} \mu_{\text{Q}}^m Q_{\text{т}} \left\{ \frac{1}{2} \left[(1 + \bar{z}(t)) \sqrt{1 - \frac{\bar{p}_d(t)}{\xi_{\text{Pm}}}} - (1 - \bar{z}(t)) \sqrt{1 + \frac{\bar{p}_d(t)}{\xi_{\text{Pm}}}} \right] \right\} \\ \text{при } \bar{z}(t) \leq z_n; \\ \sqrt{1 - \frac{\bar{p}_d(t)}{\xi_{\text{Pm}}}} \text{ при } z_{\text{max}} > \bar{z}(t) > z_n; \end{cases} \tag{14}$$

– уравнения изменения свободного объёма камеры сгорания

$$\frac{dV_{\text{св}}}{dt} = S u(t); \tag{15}$$

– уравнения материального баланса камеры сгорания при изменении $F_{кр}$

$$V_{\text{св}} \frac{dp_{\text{к}}(t)}{dt} = kRT_{\text{к}} \chi_{\text{к}} S \rho_{\text{т}} u(t) - k \sqrt{RT_{\text{к}}} \mu_{\text{с}} A(k) \times (F_{\text{кр}} - f(y(t))) p_{\text{к}}(t) - p_{\text{к}}(t) S u(t); \tag{16}$$

– уравнения состояния

$$p_k(t) = \rho_T RT_k; \quad (17)$$

– степенного закона горения твёрдого топлива

$$u(t) = u_1(p_k(t))^v, \quad (18)$$

где $R_{эмп}$ и L – активное (Ом) и индуктивное (Гн) сопротивление обмотки управления;

$i(t)$ и $U_{вх}$ – сила тока (А) и напряжение (В);

$K_{пэ}$ – коэффициент противо-ЭДС (В · с/м);

$\alpha(t)$ и J – угол поворота якоря (рад) и момент инерции на валу (Н/м²);

K_{mi} – коэффициент, характеризующий моментную характеристику (Н · м/А);

$K_{m\alpha}$ – коэффициент, характеризующий жёсткость «магнитной пружины» (Н · м/рад);

b_m и $b_{вп}$ – коэффициент вязкого трения якоря ЭМП и поршня ГЦ (Н · с/м);

$C_{эмп}$, $C_{п}$ и $C_{н}$ – жёсткость «магнитной пружины» электромеханического преобразователя, механической пружины гидроцилиндра и нагрузки (Н/м);

A , W_0 – площадь поршня (м²) и объём полости (м³) ГЦ;

$y(t)$ – перемещение штока центрального тела (м);

E – приведённый модуль объёмной упругости (Па);

$\bar{p}_d(t)$ и $\bar{z}(t)$ – перепад давлений на ГЦ (Па) и смещение струйной трубки (м);

μ_Q^m и ξ_{pm} – коэффициент восстановления расхода и давления струйной трубки;

Q_T – расход через струйную трубку (м³/с); m

– масса поршня ГЦ (кг);

$F_{тр}$ – сила сухого трения (Н).

На рисунках 8–10 представлены графики переходных процессов в камере сгорания с учётом модели исполнительного механизма – составленной по уравнениям (11) – (18) и без неё [4, 5]. Как видно из рисунков 8–10, при применении струйной гидравлической рулевой машины выход на режим с меньшей тягой осуществляется быстрее примерно на 0,3 с,

чем при ступенчатом изменении площади критического сечения сопла $F_{кр}$, т.к. центральное тело открывает $F_{кр}$ до тех пор, пока давление в камере сгорания не достигнет заданного значения, а не до заданного значения $F_{кр}$. В результате чего перемещение центрального тела сопла значительно превышает значения установившегося режима. На рисунке 11 показано, как система поддержания постоянного давления отработывает возмущающее воздействие. Поддерживать постоянное давление в камере сгорания необходимо после гашения двигателя на уровне чуть ниже заданного для повторного воспламенения заряда твёрдого топлива. Только так можно сократить время для повторного запуска двигателя и достичь желаемых характеристик.

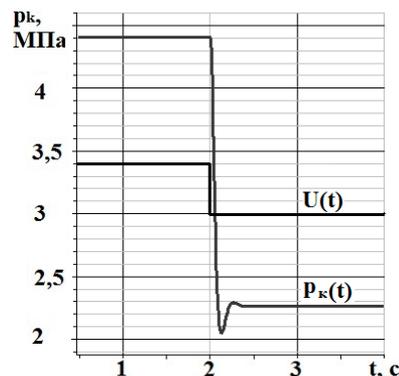


Рисунок 8. Изменение давления в камере сгорания при ступенчатом изменении задающего сигнала по напряжению

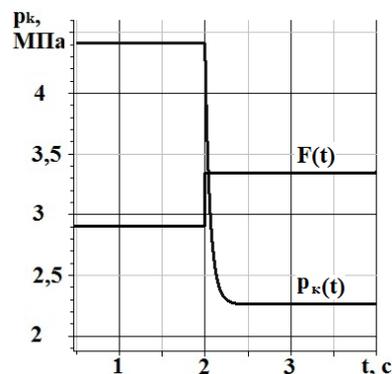


Рисунок 9. Изменение давления в камере сгорания при ступенчатом изменении площади критического сечения сопла

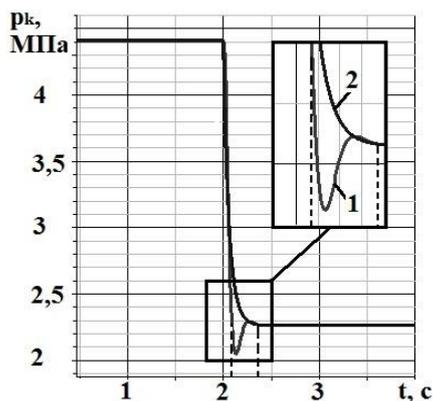


Рисунок 10. Сравнение переходных процессов: 1 – с учётом модели гидроагрегата; 2 – без неё

В момент времени $t = 2$ с ступенчато меняется скорость горения ТТ в камере сгорания и падает давление. Для поддержания его на заданном уровне система автоматически уменьшает перемещение центрального тела на открытие $F_{кр}$, после чего давление в камере поднимается до заданного значения.

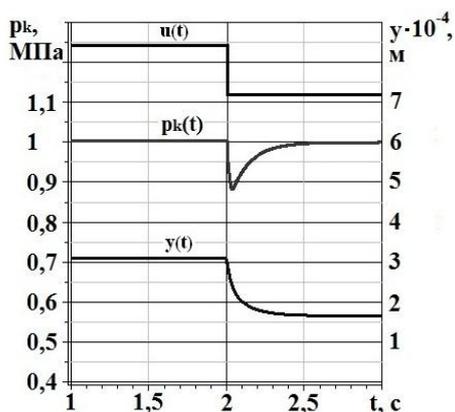


Рисунок 11. Работа системы поддержания давления в камере после гашения двигательной установки

Модель регулируемого РДТТ с комбинированной системой управления гашением и подготовкой к повторному запуску

Рассмотрев принцип работы подсистем регулирования в отдельности, было проведено исследование комбинированной электрогидравлической системы управления гашением заряда при одновременном регулировании давления в камере сгорания и расхода хладагента и получены графики переходных процессов (рисунок 12). Управление гашением происходит по заранее заданной

программе. В момент времени $t = 2$ с, при достижении уровня внутрикамерного давления, соответствующего значению минимально необходимого, регулятор расхода хладагента должен уменьшить расход. Гидроагрегат регулятора расхода обрабатывает управляющее воздействие на изменение расхода хладагента из форсунок. Через 0,1 с устанавливается заданный расход хладагента. Благодаря регулированию расхода хладагента с помощью регулятора и изменения $F_{кр}$ с помощью РМ устанавливается необходимая величина внутрикамерного давления, скорости горения и газоприхода. Давление в двигателе стабилизируется за 0,2 с без перерегулирования и поддерживается на заданном уровне, позволяющем сократить время повторного запуска. Рулевая машина регулятора давления успевает обрабатывать возмущение, и на величине давления в камере сгорания изменение расхода жидкости из форсуночного блока не сказывается.

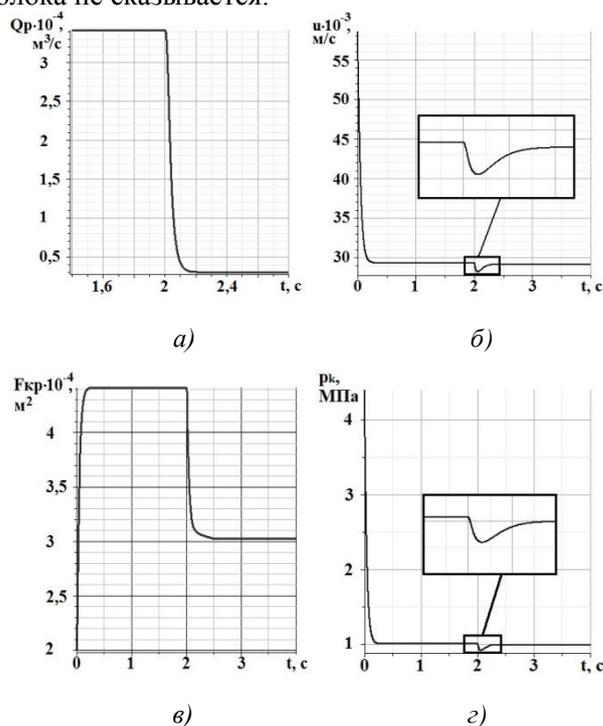


Рисунок 12. Переходные процессы в комбинированной системе управления гашением: а) изменение расхода хладагента через регулятор, б) изменение скорости горения; в) изменение площади критического сечения сопла; г) изменение давления в камере

Следовательно, качество работы регуляторов в комбинированной системе управления не зависит друг от друга, что и требовалось доказать.

Заключение

Представлено одно из возможных решений задачи глубокого регулирования модуля тяги (≥ 50) и многократного включения-выключения РДТТ за счет использования трёхкохтурной электрогидравлической системы управления со встроенными гидроагрегатами в составе регулируемого ракетного двигателя. Исследуется контур системы регулирования, отвечающий за гашение и подготовку двигателя к повторному запуску. По результатам численного моделирования динамики камеры сгорания без учёта модели исполнительного механизма и с ней видно:

- с учётом модели регулятора расхода время переходного процесса в РДТТ увеличивается на 0,2 с;
- с учётом модели РМ выход на режим с меньшей тягой осуществляется быстрее примерно на 0,3 с, чем при ступенчатом изменении $F_{кр}$.

Показано, как системы поддержания расхода хладагента и давления в камере сгорания отрабатывают возмущающие воздействия и как с помощью комбинированной системы управления осуществить задачу мгновенного гашения и подготовки к повторному запуску. По результатам проведённого моделирования видно, что необходимая величина внутрикамерного давления, скорости горения устанавливается через 0,05 с при расходе хладагента $3,4 \times 10^{-4}$ м³/с. В соответствии с программой управления на впрыск при достижении необходимого внутрикамерного давления система перестраивает режим на менее

интенсивный, и через 0,1 с устанавливается заданный расход. В случае падения давления ниже необходимого с помощью РМ оно стабилизируется через 0,2 с без перерегулирования и поддерживается на заданном уровне, позволяющем сократить время повторного запуска, при этом качество работы регуляторов системы управления не зависит друг от друга.

Список использованных источников

- [1] Петренко В.И., Соколовский М.И., Зыков Г.А., Лянгузов С.В., Тодощенко А.И., Попов В.Л., Потапов Б.Ф., Севастьянов В.В., Ярушин С.Г. Управляемые энергетические установки на твердом топливе / Под общ.ред. М.И. Соколовского и В.И. Петренко. М.: Машиностроение. 2003. 464 с.
- [2] Кривошеев И.А., Целищев В.А., Бачурин А.Б., Стрельников Е.В. Опыт разработки комбинированного РДТТ многократного включения // Вестник УГАТУ. 2012. Т. 16. № 2 (47). С. 174–188.
- [3] Пат. 2443895 РФ, МПК F02K9/92 F02K9/86. Регулируемый ракетный двигатель твердого топлива / Ахметов Ю.М., Бачурин А.Б., Стрельников Е.В., Целищев В.А. Заявл. 02.09.2010; опубл. 27.02.2012.
- [4] Присняков В.Ф. Динамика ракетных двигателей твердого топлива: учеб. пособие для вузов. М.: Машиностроение, 1984. 248 с.
- [5] Зезин В.Г., Петренко В.И., Попов В.Л., Русак А.М., Савченко В.И., Симонов Е.А., Феофилактов В.И. Регулируемые твердотопливные двигательные установки / Миасс: ГРЦ «КБ им. акад. В.П. Макеева», 1996. 295 с.
- [6] Месропян А.В., Целищев В.А. Моделирование гидравлических рулевых машин. Уфа: УГАТУ, 2008. 211 с.

PROCESS MODELING ELECTRO-HYDRAULIC CONTROL SYSTEM CANCELED OR RE-LAUNCH ROCKET ENGINE SOLID FUEL

A.B. Bachurin
E.V. Strel'nikov
V.A. Tselishev

Ufa State Aviation Technical
University
Ufa,
Ul. K. Marksa, 12
Russia, 450000
e_strelnikov@mail.ru

Within the framework of the contemporary problem solving serial use of solid propulsion in space industry related disabilities deep traction control module and multiple on-off setting, proposed the introduction of a combined system of governance. The article provides a diagram of a controlled rocket propulsion system, equipped with a dual-circuit electrohydraulic control system, and describes how to control laid down in its foundation. The analysis of transients in a rocket engine solid fuel in separate and combined use of control subsystems responsible for the extinction of the engine and preparing to re-launch.

Key words: *solid rocket motor; refrigerant; combined management system; dynamic model; steering gear.*

References

- [1] Petrenko, V.I., Sokolowsky, M.I., Zykov, A., Lyanguzov, S.V., Todoschenko, A.I., Popov, V.L., Potapov, B.F., Sevastiyarov, V.V. and Yarushin S.G. (2003), Upravliyemie energeticheskie ustanovki na tverdom toplive [Managed power plants for solid propellants], in Sokolowsky, M.I.(ed.) and Petrenko, V.I. (ed.), Mechanical Engineering, Moscow, Russia.
- [2] Krivosheev, I.A., Tselishev, V.A., Bachurin, A.B. and Strel'nikov, E.V. (2012), Opyt razrabotki kombinirovannogo RDTT mnogokratnogo vkljuchenija [Experience development combined SRM inclusion of multiple], (in Russian), *Vestnik UGATU*, vol. 16, no. 2 (47), pp. 174-188.
- [3] Akhmetov, Y.A., Bachurin, A.B., Strel'nikov, E.V. and Tselishev, V.A., Ufa State Aviation Technical University (2012), Reguliruemyy raketnyj dvigatel' tverdogo topliva [Adjustable solid propellant motor], Russia, Pat. 2443895 MPK F02K9/92 F02K9/86.
- [4] Prisnyakov, V.F. (1984), Dinamika raketnih dvigatelei tverdogo topliva [Dynamics of solid rocket motor fuel]. Textbook for universities, Mechanical Engineering, Moscow, Russia.
- [5] Zezin, V.G., Petrenko, V.I., Popov, V.L., Rusak, A.M., Savchenko, V.I., Simonov, E.A. and Feofilaktov V.I. (1996), Reguliruemye tverdotoplivnye dvigatel'nye ustanovki [Adjustable solid propulsion systems], Miass: SRC.
- [6] Mesropyan, A.V. and Tselishev, V.A. (2008), Modelirovanie gidravlicheskih rulevyh mashin [Modeling of hydraulic steering gears], Ufa: USATU.