

УДК 621.454.3

ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ГАШЕНИЕМ ТВЕРДОТОПЛИВНОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

А. Б. Бачурин¹, Е. С. Литвинов², Е. В. Стрельников³, В. А. Целищев⁴

¹bachurinsasha1987@mail.ru, ²jonny875@bk.ru, ³e_strelnikov@mail.ru, ⁴pgl.ugatu@mail.ru

¹⁻⁴ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 1 июня 2015 г.

Аннотация. В рамках решения современной проблемы серийного использования твердотопливных двигательных установок в космической отрасли, связанной с ограниченными возможностями глубокого регулирования модуля тяги и многократного включения-выключения установки, предлагается внедрение комбинированной системы управления. Приводится схема регулируемой ракетной двигательной установки, оснащенной данной системой управления, и описываются способы регулирования, заложенные в ее основу. Рассматриваются переходные процессы в РДТТ при использовании контура электрогидравлической системы, отвечающего за гашение и подготовку двигателя к повторному запуску.

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

Современные ракетные двигательные установки на твердом топливе, применяющиеся на данном этапе развития космической отрасли, к сожалению, не всегда отвечают требованиям, сложившимся на мировом рынке. Основными недостатками, имеющимися у данного типа двигателей, являются:

- 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].

В связи с этим, во многих государствах с каждым годом уделяется все больше времени и средств на развитие и совершенствование отрасли ракетостроения. Укрепляется рост интеграционных процессов национальных космиче-

ских программ, с целью консолидации научно-образовательных центров (НОЦ) и предприятий для создания более эффективных конструкций ракетных двигательных установок нового поколения.

Основное внимание уделяется исследованию и глубокому анализу работы высокоточных систем автоматического регулирования (САР) со встроенными средствами интеллектуальной гидроавтоматики, которые могут быть внедрены в систему ракетного двигателя.

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 энергомасовое совершенство РДУ.

Определившись, таким образом, со сложившейся на данный момент проблемой и возможным вариантом ее решения, а именно внедрением комбинированной системы управления, необходимо проанализировать какие способы регулирования могут быть заложены в ее 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), 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), ФГУП «НПЦАП» (Москва), ФНПЦ «Алтай» (Бийск), ФЦДТ «Союз» (Дзержинский).

Благодаря исследованиям, проведенным 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 твердого топлива S , площади критического сечения сопла $F_{кр}$ и дополнительно вводимой в камеру сгорания массы некоторого рабочего тела (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 твердого топлива с трехконтурной электрогидравлической системой управления, сочетающей в себе все три данных способа регулирования (S , $F_{кр}$ и m_f) (рис. 1) [3].

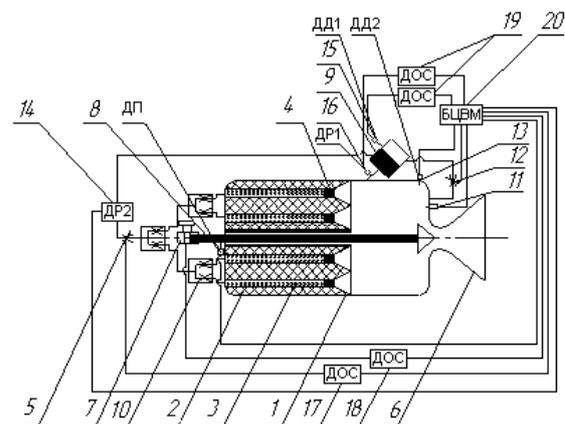


Рис. 1. Схема ракетного двигателя твердого топлива многократного включения:

- 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, используются:

- подсистема слива рабочей жидкости из каналов в заряде твердого топлива, позволяющая увеличивать тягу двигателя на величину, превышающую номинальное значение, более чем в 50 раз;

- подсистема поддержания постоянного давления, за счет 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 твердого топлива и замед-

лить 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 трехконтурной системы в целом к более детальному исследованию контуров, отвечающих за работу двигательной установки

Так как контуру, отвечающему за глубокое изменение тяги РДУ, посвящено большое количество работ, было принято решение рассматривать только контур, отвечающий за гашение заряда ТТ и подготовку двигательной установки к мгновенному повторному запуску. Этот контур включает в себя подсистемы изменения площади критического сечения сопла и впрыска хладагента в камеру сгорания.

В ходе работы были рассмотрены процессы, происходящие в камере сгорания при впрыске хладагента и при изменении площади критического сечения сопла без учета модели исполнительного механизма, а в последующем и с ней (для каждой из подсистем в отдельности и при их комбинированном сочетании).

УРАВНЕНИЯ ДИНАМИКИ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ПРИ ВПРЫСКЕ ЖИДКОГО ХЛАДАГЕНТА БЕЗ УЧЕТА МОДЕЛИ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА

Исследование модели динамики камеры сгорания РДУ является одним из необходимых этапов разработки любой системы регулирования двигательной установки. Данная модель необходима для разработки принципов построения системы управления тягой и расходом топлива РДТТ, а также для выбора параметров, определяющих динамику управления.

В традиционном варианте исполнения основными параметрами, определяющими динамику управления и характеризующими работу ракетной двигательной установки твердого топлива, являются давление в камере сгорания p_k , температура продуктов сгорания T_k , свободный объем камеры V_{cb} и др. Характер изменения именно этих величин по времени, а также их зависимости от возмущающих воздействий

и управляющих факторов формируют математическую модель динамики камеры сгорания РДТТ [4, 5]. С учетом вышесказанного математическая модель РДТТ при впрыске жидкого хладагента в камеру сгорания будет состоять из следующей совокупности уравнений:

– уравнения сохранения массы в камере сгорания

$$\frac{V_{cb}}{RT_k(t)} \frac{dp_k(t)}{dt} = Y(t) \frac{RT_v}{RT_k(t)} - k \frac{\mu_c A(k) F_{kp}}{\sqrt{RT_k(t)}} p_k(t) + \frac{k-1}{RT_k(t)} H_x Y_x(t); \quad (1)$$

– уравнения сохранения энергии в камере сгорания

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

– уравнения изменения свободного объема камеры сгорания

$$\frac{dV_{cb}}{dt} = Su; \quad (3)$$

– уравнения состояния

$$p_k(t) = \rho_T \cdot R \cdot T_k(t); \quad (4)$$

– уравнения изменения массового расхода хладагента, подаваемого в камеру сгорания

$$m_f(t) = \mu_f \cdot F_f \cdot N \cdot \left(\sqrt{\frac{2 \cdot (P_n - p_k(t))}{\rho_l}} \right); \quad (5)$$

– уравнения изменения секундного газопритока от испарения хладагента

$$Y_x(t) = m_f(t) \cdot \frac{\sqrt{\frac{2 \cdot (P_n - p_k(t))}{\rho_l}} \cdot t}{\left(x_p + \left(\sqrt{\frac{2 \cdot (P_n - p_k(t))}{\rho_l}} \cdot t \right) \right)}; \quad (6)$$

– степенного закона горения твердого топлива

$$u = u_1 \cdot (p_k(t))^v, \quad (7)$$

где V_{cb} – начальный свободный объем камеры сгорания (m^3); $p_k(t)$ – давление в камере сгорания (Па); R – газовая постоянная ($Дж/кг \cdot m^3$); $T_k(t)$ – температура газов в камере сгорания (К); $Y(t) = \rho_T Su$ – секунднй газоприток от сгорания твердого топлива (ТТ) ($кг/с$); T_v – изохорная температура горения ТТ (К); k – показатель адиабаты; μ_c – коэффициент расхода газов через сопло РДУ; $A(k)$ – функция условного показателя расширения; F_{kp} – площадь критического сечения сопла (m^2); H_x – приведенная теплота испарения жидкого хладагента, впрыс-

нутого в камеру сгорания (Дж); $Y_x(t)$ – секундный газоприход от испарения жидкого хладагента, подаваемого в камеру сгорания (кг/с); S – площадь поверхности горения заряда ТТ (м^2); u – скорость горения заряда ТТ (м/с); ρ_T – плотность заряда ТТ ($\text{кг}/\text{м}^3$); $m_f(t)$ – массовый расход жидкого хладагента, подаваемого в камеру сгорания (кг/с); μ_f – коэффициент расхода через форсунку; F_f – площадь проходного сечения форсунки (м^2); N – количество форсунок; $P_{\text{п}}$ – давление питания пневмогидроаккумулятора системы впрыска жидкого хладагента (Па); ρ_l – плотность хладагента ($\text{кг}/\text{м}^3$); x_p – координата контактного разрыва, разделяющего парогазовую зону и зону продуктов сгорания (м); t – время переходного процесса (с); $Q_l(t)$ – объемный расход жидкого хладагента, подаваемого в камеру сгорания ($\text{м}^3/\text{с}$).

Построенные по уравнениям (1) – (7) переходные процессы в РДТТ, при ступенчатом изменении расхода жидкого хладагента, приведены на рис. 2.

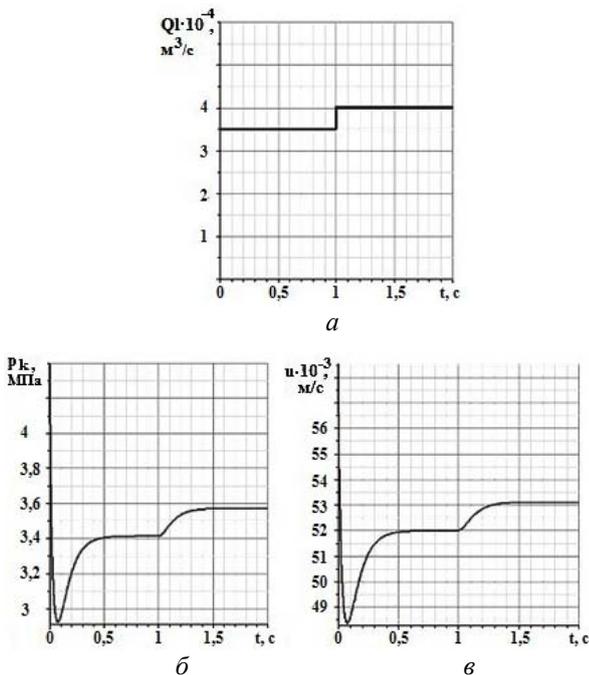


Рис. 2. Переходные процессы в камере сгорания при ступенчатом изменении m_f : а – программа управления расходом жидкого хладагента; б – внутрикамерное давление; в – скорость горения заряда твердого топлива

Согласно полученным кривым:

1) на начальном участке впрыска жидкого хладагента с расходом $3,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ за 0,05 с дос-

тигается падение $p_k(t)$ и $u(t)$, но в дальнейшем в течение 0,4 с наблюдается их дальнейший рост;

2) последующее увеличение m_f с $3,4 \cdot 10^{-4}$ до $4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ приводит к росту $p_k(t)$ и $u(t)$, связанного с образованием большего количества парогазовой смеси, чем на предыдущем режиме.

Отсюда можно сделать вывод, что использование только подсистемы впрыска не позволяет осуществить задачу мгновенного останова РДУ и последующего повторного запуска, т.к. вначале происходит мгновенное падение давления, а затем его постепенный рост, связанный с образованием парогазовой смеси в камере сгорания.

УРАВНЕНИЯ ДИНАМИКИ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ПЛОЩАДИ СЕЧЕНИЯ СОПЛА БЕЗ УЧЕТА МОДЕЛИ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА

Оценив возможные пути изменения внутрикамерного давления, а соответственно и модуля тяги, можно сделать вывод, что основным способом регулирования тяги является изменение расхода рабочего тела.

Расход продуктов сгорания зависит от давления в камере, площади критического сечения сопла, скорости горения и площади открытой поверхности твердого топлива, чувствительности скорости горения к давлению [4].

Определим интересующую нас чувствительность давления в камере сгорания к изменению площади критического сечения сопла.

Для РДТТ с изменением площади критического сечения сопла математическая модель включает в себя следующую совокупность уравнений [5]:

– уравнение сохранения массы в камере сгорания

$$V_{\text{св}} \frac{dp_k(t)}{dt} = kRT_k(t)\chi_k S \rho_T u - k\sqrt{\chi_k RT_k(t)}\mu_c A(k) \times \times F_{\text{кр}} p_k(t) - p_k(t)Su; \quad (8)$$

– уравнение сохранения энергии в камере сгорания

$$p_k(t)V_{\text{св}} \frac{dT_k(t)}{dt} = (kT_k(t) - T_k(t))\rho_T Su - (k-1)T_k(t) \times \times \mu_c A(k) \frac{F_{\text{кр}} p_k(t)}{\sqrt{\chi_k RT_k(t)}}; \quad (9)$$

– уравнение изменения свободного объема камеры сгорания

$$\frac{dV_{\text{св}}}{dt} = Su; \quad (10)$$

– уравнение состояния

$$p_k(t) = \rho_T RT_k(t); \quad (11)$$

– степенной закон горения топлива

$$u = u_1(p_k(t))^{\nu}, \quad (12)$$

где χ_k – средний по объему и времени коэффициент тепловых потерь.

Построенные по уравнениям (8) – (12) переходные процессы в РДТТ при ступенчатом изменении площади критического сечения сопла приведены на рис. 3.

Кривая 1 отражает упрощенную модель, построенную без учета массы продуктов сгорания, температура в камере – величина постоянная. Кривая 2 учитывает массу продуктов сгорания, температура в камере также величина постоянная. Кривая 3 построена на основании учета массы продуктов сгорания, температура в камере – величина переменная.

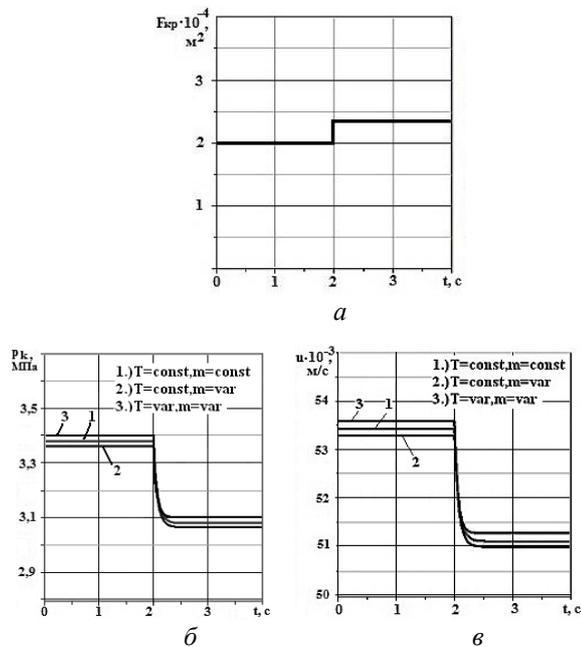


Рис. 3. Переходные процессы в камере сгорания при ступенчатом изменении $F_{кр}$:

a – программа управления площадью критического сечения сопла; *б* – внутрикамерное давление; *в* – скорость горения заряда твердого топлива

Согласно полученным кривым:

1) при увеличении площади критического сечения сопла с 2×10^{-4} до $2,3 \times 10^{-4} \text{ м}^2$ достигается падение $p_k(t)$ и $u(t)$ за 0,3 с, т.е. время переходного процесса достаточно велико и не удовлетворяет условиям мгновенного гашения двигательной установки ($\approx 0,003 \div 0,005$ с);

2) расхождение точек на кривых, построенных с разными условиями 1,2,3 < 3%, что

свидетельствует о целесообразности использования в дальнейших расчетах упрощенной модели с условием 1 или 2.

Отсюда, также можно сделать вывод, что использование только подсистемы изменения площади критического сечения сопла не позволяет осуществить задачу мгновенного останова РДУ и последующего повторного запуска, т.к. время переходного процесса достаточно велико.

МОДЕЛЬ РЕГУЛИРУЕМОГО РДТТ С ПОДСИСТЕМОЙ ВПРЫСКА ЖИДКОГО ХЛАДАГЕНТА В КАМЕРУ СГОРАНИЯ

Рассмотрев переходные процессы в камере сгорания при впрыске жидкого хладагента и изменении площади критического сечения сопла без учета модели исполнительного механизма, было доказано, что невозможно добиться желаемого результата (мгновенного останова двигательной установки) при применении только одного из способов регулирования.

Для подтверждения данного высказывания только уже с учетом модели исполнительных механизмов было также проведено математическое моделирование РДУ.

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 системы автоматического регулирования.

На рис. 4 представлена функциональная схема подсистемы регулирования впрыска хладагента в камеру сгорания.

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

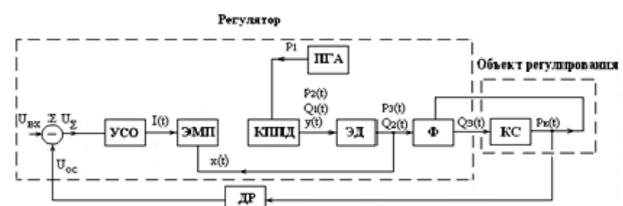


Рис. 4. Функциональная схема подсистемы регулирования расхода жидкого хладагента

Тип подачи хладагента в такой подсистеме вытеснительный [6], осуществляемый посредством образования продуктов сгорания ТТ в ПГА. В качестве исполнительного механизма используется регулятор расхода. Расход жидкости через регулятор устанавливается положением дросселя, а постоянство перепада давления на дросселе – редукционным клапаном.

Математическая модель подсистемы регулирования количества жидкого хладагента, в данном случае, включает в себя уравнения внутрикамерных процессов двигателя (объект регулирования) и уравнения регулятора расхода, с подсоединенным пневмогидроаккумулятором и форсуночным блоком (регулятор) и выглядит следующим образом:

– уравнение электрической цепи электро-механического преобразователя, управляющего дросселем

$$(U_{др} - k_{oc} Q_{др}(t)) K_y = R_{др} i_{др}(t) + L_{др} \frac{di_{др}(t)}{dt} + K_{ПЭ} \frac{dx(t)}{dt}; \quad (13)$$

– уравнение движения управляющей заслонки дросселя

$$m_{др} \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = K_{fid} i_{др}(t) - b_{вдр} \frac{dx(t)}{dt} - c_{др} x(t); \quad (14)$$

– уравнение движения золотника клапана постоянного перепада давления

$$m_k \frac{d^2 y(t)}{dt^2} = A(p_2(t) - p_3(t)) - b_{вк} \frac{dy(t)}{dt} - c_k y(t); \quad (15)$$

– уравнение баланса расходов через регулятор расхода

$$\mu_k b_k y(t) \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2(t))}{\rho_{ж}}} - \mu_{др} b_{др} x(t) \sqrt{\frac{2(p_2(t) - p_3(t))}{\rho_{ж}}} = \frac{W_0}{2E} \frac{dp_2(t)}{dt} + A \frac{dy(t)}{dt}; \quad (16)$$

– уравнение баланса расходов через форсунки

$$\mu_{др} b_{др} x(t) \sqrt{\frac{2(p_2(t) - p_3(t))}{\rho_{ж}}} = \mu_{ф} \frac{\pi d_{ф}^2}{4} N \sqrt{\frac{2(p_3(t) - p_k(t))}{\rho_{ж}}} + \frac{W_0}{2E} \frac{dp_3(t)}{dt}; \quad (17)$$

– уравнение сохранения массы в камере сгорания при впрыске жидкого хладагента

$$\frac{V_{cb}}{RT_k(t)} \frac{d}{dt} p_k(t) = \rho_T S u \frac{RT_V}{RT_k(t)} - k \frac{\mu_c A(k) F_{кр}}{\sqrt{RT_k(t)}} p_k(t) - \frac{k-1}{RT_k(t)} H_x Y_x(t); \quad (18)$$

– уравнение сохранения энергии в камере сгорания при впрыске жидкого хладагента

$$\frac{p_k(t) V_{cb}}{(RT_k(t))^2} \frac{d(RT_k(t))}{dt} = Y(t) \left(\frac{\chi_k RT_V}{RT_k(t)} - 1 \right) - (k-1) \times \frac{\mu_c A(k) F_{кр}}{\sqrt{RT_k(t)}} p_k(t) - Y_x(t) - \frac{k-1}{RT_k(t)} H_x Y_x(t); \quad (19)$$

– уравнение изменения свободного объема камеры сгорания

$$\frac{dV_{cb}}{dt} = S u; \quad (20)$$

– уравнение состояния

$$p_k(t) = \rho_T RT_k(t); \quad (21)$$

– степенной закон горения твердого топлива

$$u = u_1 (p_k(t))^v, \quad (22)$$

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;

$Q_k(t) = \mu_k b_k y(t) \sqrt{\frac{2(p_1(t) - p_2(t))}{\rho_{ж}}}$ – объемный

расход жидкого хладагента через КППД ($\text{м}^3/\text{с}$);

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

расход жидкого хладагента через ЭД ($\text{м}^3/\text{с}$);

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

расход жидкого хладагента через форсунки ($\text{м}^3/\text{с}$); K_y – коэффициент усиления по напряжению;

$K_{пр}$ – коэффициент противо-ЭДС в ЭМП (В·с/м); $x(t)$ и $y(t)$ – перемещение 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_k – коэффициент вязкого трения заслонки ЭД и золотника КППД (Н·с/м);

$c_{др}$ и c_k – коэффициент жесткости пружины ЭД и КППД (Н/м); A и W_0 – площади торцевых поверхностей (м^2) и объем рабочей полости (м^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 хладагента ($\text{кг}/\text{м}^3$) и приведенный модуль объемной упругости (Па);

p_1 – давление на входе в КППД (Па); $p_k(t)$ – давление в камере сгорания (Па).

На рис. 5 и 6 представлены графики изменения сигнала управления ЭМП ЭД и перемещения его заслонки, полученные по результатам расчетов.

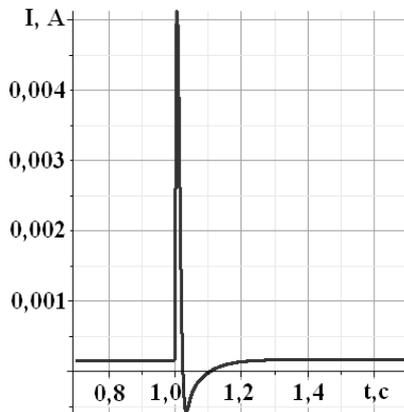


Рис. 5. Сигнал управления ЭМП электромагнитного дросселя

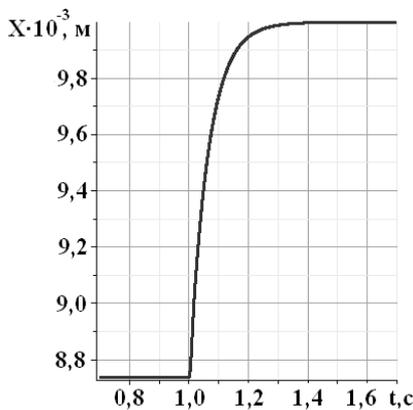


Рис. 6. Перемещение заслонки электромагнитного дросселя

Для сравнения влияния исполнительного механизма на переходные процессы в камере сгорания на рис. 7 представлен график изменения внутрикамерного давления с учетом модели исполнительного механизма – составленной по уравнениям (13) – (22) и без нее – составленной по уравнениям (1) – (7).

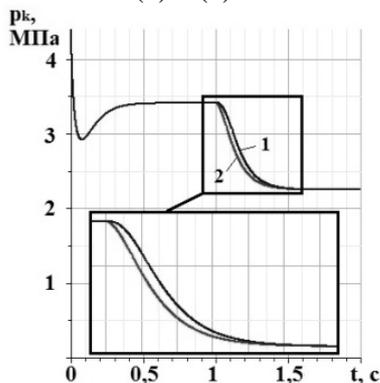


Рис. 7. Сравнение переходных процессов: 1 – с учетом модели гидроагрегата; 2 – без нее

Согласно полученной сравнительной характеристике: при учете 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 неучет 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 обрабатывает возмущающее воздействие, вызванное изменением давления в ПГА. На рис. 8 представлен такой график.

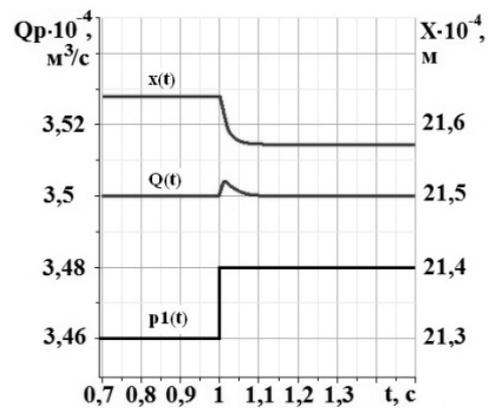


Рис. 8. Работа системы поддержания расхода хладагента, впрыснутого в камеру

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 обрабатывает возмущающее воздействие.

МОДЕЛЬ РЕГУЛИРУЕМОГО РДТТ С ПОДСИСТЕМОЙ РЕГУЛИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

Регулирование давления в РДУ с изменяемой площадью критического сечения осуществляется с помощью рулевой машины, которая выполняет целый ряд функций: от поддержания постоянного давления в камере до его сброса при переходе с максимального уровня тяги на минимальный, и обратно [1].

На рис. 9 представлена функциональная схема подсистемы регулирования давления

в камере сгорания за счет изменения площади критического сечения сопла.

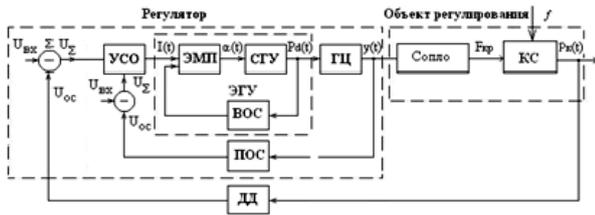


Рис. 9. Функциональная схема подсистемы регулирования давления в камере сгорания РДУ

В ее состав входит измеритель электрического сигнала рассогласования (Σ), электронный усилитель сигнала ошибки (УСО), электромеханический преобразователь (ЭМП), струйный гидроусилитель (СГУ), гидроцилиндр (ГЦ), датчик давления (ДД), потенциометрический датчик обратной связи по перемещению центрального тела (ПОС) и объект – (КС) [7, 8].

Схема регулятора состоит из двух контуров: основного, обусловленного наличием у ГЦ потенциометрической обратной связи (ПОС), и внутреннего, обусловленного наличием внутренней обратной связи (ВОС) между ЭМП и ГУ, составляющих одно целое – ЭГУ [9].

Математическая модель подсистемы регулирования давления площадью критического сечения состоит из следующих уравнений:

– уравнения электрической цепи ЭМП

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

где $K_{\text{ос}} = \frac{U_{\text{вх}}}{P_{\text{к max}}}$; (23)

– уравнения ЭМП как механической системы (уравнение моментов)

$$J \frac{d^2 \alpha(t)}{dt^2} = K_{mi} i(t) - K_{m\alpha} \alpha(t) - b_m \frac{d\alpha(t)}{dt} - C_{\text{ЭМП}} \alpha(t); (24)$$

– уравнения баланса расходов

$$\left(\frac{W_0 + A \cdot y(t)}{E} + C_{\text{н}} \right) \frac{dp_d(t)}{dt} + A \frac{dy(t)}{dt} = \begin{cases} \mu_Q^m Q_{\text{т}} \left\{ \frac{1}{2} \left[(1 + \bar{z}(t)) \sqrt{1 - \frac{\bar{p}_d(t)}{\xi_{Pm}}} - (1 - \bar{z}(t)) \sqrt{1 + \frac{\bar{p}_d(t)}{\xi_{Pm}}} \right] \right\} \\ \text{при } \bar{z}(t) \leq z_n; \\ \sqrt{1 - \frac{\bar{p}_d(t)}{\xi_{Pm}}} \text{ при } z_{\text{max}} > \bar{z}(t) > z_n; \end{cases} (25)$$

– уравнения движения штока гидроцилиндра

$$m \frac{d^2 y(t)}{dt^2} = A p_d(t) - b_{\text{вн}} \frac{dy(t)}{dt} - F_{\text{тр}} - C_{\text{н}} y(t); (26)$$

– уравнения изменения свободного объема камеры сгорания

$$\frac{dV_{\text{св}}}{dt} = S u(t); (27)$$

– уравнения материального баланса камеры сгорания при изменении площади критического сечения сопла

$$V_{\text{св}} \frac{dp_k(t)}{dt} = k R T_{\text{к}} \chi_{\text{к}} S p_{\text{т}} u(t) - k \sqrt{R T_{\text{к}}} \mu_{\text{с}} A(k) \times (F_{\text{кр}} - f(y(t)) p_k(t) - p_k(t) S u(t); (28)$$

– уравнения состояния

$$p_k(t) = \rho_{\text{т}} R T_{\text{к}}; (29)$$

– степенного закона горения твердого топлива

$$u(t) = u_1 (p_k(t))^v, (30)$$

где $R_{\text{ЭМП}}$ и L – активное (Ом) и индуктивное (Гн) сопротивление обмотки управления; $i(t)$ и $U_{\text{вх}}$ – сила тока (А) и напряжение (В); $K_{\text{пз}}$ – коэффициент противо-ЭДС (В·с/м); $\alpha(t)$ и J – угол поворота якоря (рад) и момент инерции на валу (Н·м²); K_{mi} и $K_{m\alpha}$ – коэффициент, характеризующий моментную характеристику (Н·м/А) и жесткость «магнитной пружины» (Н·м/рад); b_m и $b_{\text{вн}}$ – коэффициент вязкого трения якоря ЭМП и поршня ГЦ (Н·с/м); $C_{\text{ЭМП}}$, $C_{\text{п}}$ и $C_{\text{н}}$ – жесткость «магнитной пружины» ЭМП, механической пружины ГЦ и нагрузки (Н/м); A , W_0 – площадь поршня (м²) и объем полости (м³) ГЦ; $y(t)$ – перемещение штока центрального тела (м); E – приведенный модуль объемной 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; $Q_{\text{т}}$ – расход через струйную трубку (м³/с); m – масса поршня ГЦ (кг); $F_{\text{тр}}$ – сила сухого трения (Н).

На рис. 10–12 представлены графики переходных процессов в камере с учетом модели исполнительного механизма – составленной по уравнениям (23) – (30) и без нее – составленной по уравнениям (8) – (12).

Как видно из рис. 10–12, при применении СГРМ выход на режим с меньшей тягой осуществляется быстрее примерно на 0,3 с, чем при ступенчатом изменении площади критического сечения сопла, так как центральное тело открывает критическое сечение до тех пор, пока давление не достигнет заданного значения, а не до заданного значения площади критического сечения сопла. В результате чего перемещение центрального тела сопла значительно превышает значения установившегося режима.

На рис. 13 показано, как система поддержания постоянного давления обрабатывает возмущающее воздействие. Поддерживать постоянное давление в камере сгорания необходимо после гашения двигательной установки на уровне чуть ниже заданного для повторного воспламенения заряда. Поддерживая его на заданном уровне, можно тем самым сократить время для повторного запуска двигателя.

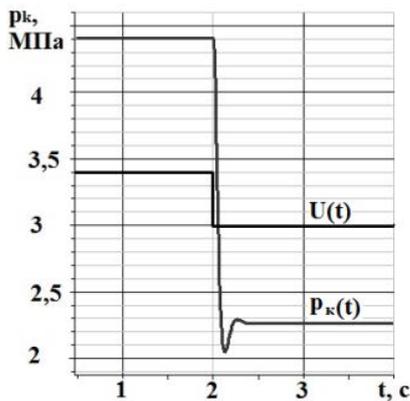


Рис. 10. Изменение давления в камере сгорания при ступенчатом изменении задающего сигнала по напряжению

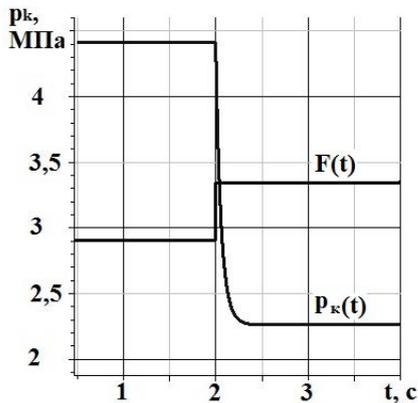


Рис. 11. Изменение давления в камере сгорания при ступенчатом изменении площади критического сечения сопла

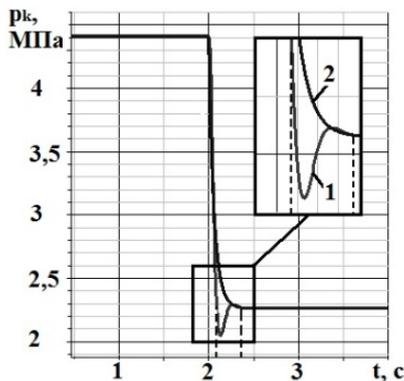


Рис. 12. Сравнение переходных процессов: 1 – с учетом модели гидроагрегата; 2 – без нее

В момент времени $t = 2$ с ступенчато меняется скорость горения твердого топлива в камере сгорания и падает давление. Для поддержания его на заданном уровне, как можно увидеть на графике, система автоматически уменьшает перемещение центрального тела на открытие площади критического сечения, после чего давление в камере поднимается до заданного значения.

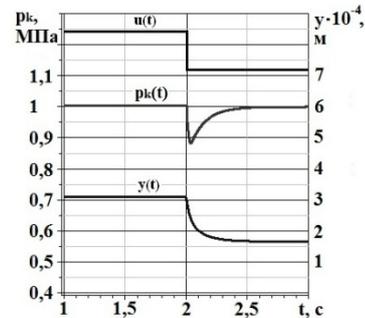


Рис. 13. Работа системы поддержания давления в камере после гашения двигательной установки

МОДЕЛЬ РЕГУЛИРУЕМОГО РДТТ С КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ ГАШЕНИЕМ И ПОДГОТОВКОЙ К ПОВТОРНОМУ ЗАПУСКУ

Для решения проблемы мгновенного гашения (выключения) и повторного запуска двигательной установки, как указывалось выше, предлагается использовать комбинированную систему управления. Однако для ее использования и дальнейшего серийного внедрения необходимо решить задачу, связанную с взаимным влиянием подсистем друг на друга и на объект в процессе регулирования.

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 жидкого хладагента и получены графики переходных процессов (рис. 14). Управление гашением происходит по заранее заданной программе. В момент времени $t = 2$ с, при достижении уровня внутрикамерного давления, соответствующего значению минимально необходимого, регулятор расхода жидкого хладагента должен уменьшить расход впрыснутой жидкости. Гидроагрегат регулятора расхода обрабатывает управляющее воздействие на изменение расхода хладагента из форсуночного блока.

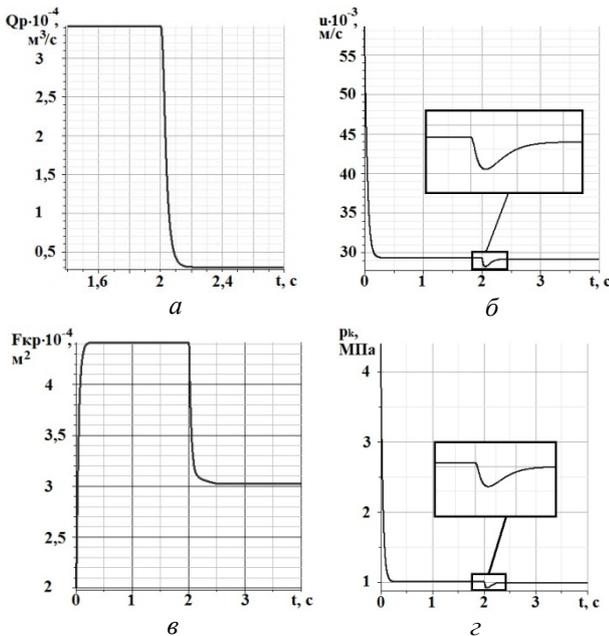


Рис. 14. Переходные процессы

гашением РДУ: *a* – изменение расхода хладагента в электрогидравлической системе управления через регулятор, *б* – изменение скорости горения; *в* – изменение площади критического сечения сопла; *г* – изменение давления в камере

Через 0,1 с устанавливается заданный расход хладагента. Благодаря регулированию расхода хладагента с помощью регулятора и изменения площади критического сечения сопла с помощью гидравлической рулевой машины устанавливается необходимая величина внутрикамерного давления, скорости горения, уменьшается газоприход. Давление в двигателе стабилизируется за 0,2 с без перерегулирования и поддерживается на заданном уровне, позволяющем сократить время повторного запуска. Гидравлическая рулевая машина регулятора давления успевает обрабатывать возмущение, и на величине давления в камере сгорания изменение расхода жидкости из форсуночного блока не сказывается.

Следовательно, качество работы регуляторов в системе управления не зависит друг от друга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлено одно из возможных решений задачи глубокого регулирования модуля тяги (≥ 50) и многократного включения-выключения твердотопливной двигательной установки за счет использования трехконтурной 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 учета модели исполнительного механизма и с ней видно:

- с учетом модели регулятора расхода время переходного процесса в РДТТ увеличивается на 0,2 с;

- с учетом модели рулевой машины выход на режим с меньшей тягой осуществляется быстрее примерно на 0,3 с, чем при ступенчатом изменении площади критического сечения сопла.

Показано, как системы поддержания расхода хладагента и давления в камере сгорания отработывают возмущающие воздействия и как с помощью комбинированной системы управления осуществить задачу мгновенного гашения и подготовки к повторному запуску.

По результатам проведенного 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 рулевой машины оно стабилизируется через 0,2 с без перерегулирования и поддерживается на заданном уровне, позволяющем сократить время повторного запуска.

Качество работы регуляторов в системе управления не зависит друг от друга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Управляемые** энергетические установки на твердом ракетном топливе / В. И. Петренко и др. М.: Машиностроение. 2003. 464 с. [V. I. Petrenko, et al. *Controlled power plants for solid rocket fuel*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie. 2003.]
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. [I. A. Krivosheev, V. A. Tselishev, et al., "Experience development combined SRM inclusion of multiple," (in Russian) in *Vestnik UGATU*, vol. 16. no. 2 (47), pp. 174-188, 2012.]
3. **Пат.** 2443895 РФ, МПК F02K9/92 F02K9/86. Регулируемый ракетный двигатель твердого топлива / Ю. М. Ахметов, А. Б. Бачурин, Е. В. Стрельников, В. А. Целищев. Заявл. 02.09.2010; опублик. 27.02.2012. [Patent 2443895, Russian Federation, МПК F02K9/92 F02K9/86. Adjustable solid propellant motor.]
4. **Присняков В. Ф.** Динамика ракетных двигателей твердого топлива: учеб. пособие для вузов. М.: Машиностроение. 1984. 248 с. [V. F. Prisnyakov, *Dynamics of solid fuel rocket engines*. Moscow: Mashinostroenie. 1984.]

5. **Регулируемые** твердотопливные двигательные установки / В. Г. Зезин, В. И. Петренко, В. Л. Попов, А. М. Русак, В. И. Савченко, Е. А. Симонов, В. И. Феофилактов. Миасс: ГРЦ «КБ им. акад. В. П. Макеева», 1996. 295 с. [V. G. Zezin, et al., *Adjustable solid propulsion systems*. Miass: SRC, 1996.]

6. **Старостенко В. Г.** Пневмогидравлические системы энергоустановок: учеб. пособие. Миасс.: ГРЦ «КБ им. акад. В. П. Макеева», 2006. 260 с. [V. G. Starostenko, *Pneumo-hydraulic of power plants*: Proc. Guide. Miass: SRC, 2006.]

7. **Целищев В. А., Русак А. М.** Исследование системы автоматического регулирования РДТТ // Газоструйные импульсные системы. Ижевск, ИжГТУ, 2003. Т. 1. С. 59–80. [V. A. Tselishev, A. M. Rusak, "Investigation automatic control system SRM," in *Gas Jet Pulse System*, vol. 1, pp. 59-80, Izhevsk: Izhevsk State Technical University, 2003.]

8. **Бачурин А. Б., Стрельников Е. В., Литвинов Е. С., Целищев В. А.** Система автоматического регулирования давления в камере сгорания РДТТ // Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17. № 3 (56). С. 26–33. [A. B. Bachurin, et al., "Automatic system for controlling the pressure in the Solid Rocket Motor combustion chamber," in *Vestnik UGATU*, vol. 17. no. 3 (56), pp. 26-33, 2013.]

9. **Месропян А. В., Целищев В. А.** Моделирование гидравлических рулевых машин. Уфа: УГАТУ, 2008. 211 с. [A. V. Mesropyan, V. A. Tselishev, *Simulation of hydraulic steering gears*. Ufa: USATU, 2008.]

electrohydraulic system responsible for the preparation and extinguishing the engine to restart.

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

About authors:

BACHURIN, Aleksandr Borisovich, master's degree in Applied Hydromechanics Dept. Cand. Tech. Sci (UGATU, 2014).

LITVINOV, Evgeny Sergeevich, postgraduate, master's degree in Applied Hydromechanics Dept. (UGATU, 2012).

STRELNIKOV, Yevgeniy Vladimirovich, master's degree in Applied Hydromechanics Dept. (UGATU, 2011).

TSELISHCHEV, Vladimir Aleksandrovich, Prof., Head of Applied Hydromechanics Dept. Dr. of Tech. Sci. (UGATU, 2000).

ОБ АВТОРАХ

БАЧУРИН Александр Борисович, старш. преподаватель каф. прикл. гидромех. М-р техн. и технол. (УГАТУ, 2011). Канд. техн. наук (ЮУрГУ, 2014). Иссл. в обл. систем управления ЛА и двиг. установок.

ЛИТВИНОВ Евгений Сергеевич, асп. каф. прикл. гидромех. М-р техн. и технол. (УГАТУ, 2012). Иссл. в обл. систем управления ЛА и двиг. установок.

СТРЕЛЬНИКОВ Евгений Владимирович, асп. каф. прикл. гидромех. М-р техн. и технол. (УГАТУ, 2011). Иссл. в обл. систем управления ЛА и двиг. установок.

ЦЕЛИЩЕВ Владимир Александрович, проф., зав. каф. прикл. гидромех. Дипл. инж.-мех. по гидравл. машинам (УГАТУ, 1982). Д-р техн. наук по тепл. двигателям (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. автоматики ЛА и двиг. установок.

METADATA

Title: Electro-hydraulic control system extinguishing solid engine.

Authors: A. B. Bachurin¹, Y. S. Litvinov², Y. V. Strelnikov³, V. A. Tselishchev⁴.

Affiliation:

¹⁻⁴ Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ¹bachurinsasha1987@mail.ru, ²jonny875@bk.ru,

³e_strelnikov@mail.ru, ⁴pgl.ugatu@mail.ru.

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU, vol. 19, no. 3 (69), pp. 81-91, 2015. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: 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 scheme controlled missile propulsion system equipped with this control system and describes how to control laid down in its foundation. We consider transients solid rocket motor using circuit