

DOI: 10.15593/2224-9982/2017.50.07

УДК 533: 621.455

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

Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ГИДРОСИСТЕМ ГАШЕНИЯ И ПОВТОРНОГО ЗАПУСКА РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

Составление любой методики расчета и рационального выбора параметров системы управления двигательной установки включает в себя несколько этапов, одним из которых является переход от математических моделей, представленных в размерном виде, к моделям с использованием безразмерных переменных. Исследование на ЭВМ математической модели комбинированной системы автоматического регулирования в безразмерном виде позволяет получить удовлетворительное с точки зрения лица, принимающего решения, качество переходного процесса путем варьирования параметров регуляторов и выбора диапазона их рациональных значений и соотношений. В статье представлены модели подсистем регулирования давления и количества впрыска жидкого хладагента в камеру сгорания с использованием безразмерных переменных и полученные в ходе проведенного анализа графики переходных процессов системы при использовании эмпирического метода подбора искомых параметров регуляторов. Результатом большого числа машинных экспериментов при целенаправленном поиске удовлетворения системы управления основным критериям качества явилась таблица значений критериев качества системы регулирования. В таблице представлен диапазон параметров исполнительных устройств системы регулирования ракетного двигателя твердого топлива, в котором образуется область автономности качества переходных процессов одного регулятора от качества работы другого регулятора при ранее заданных постоянных исходных параметрах регуляторов.

Ключевые слова: ракетный двигатель твердого топлива, жидкий хладагент, подсистема, комбинированная система управления гашением, безразмерные параметры, струйная гидравлическая рулевая машина, регулятор расхода.

A.B. Bachurin, E.V. Strelnikov, V.A. Tselischev

Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation

METHODOLOGY FOR CALCULATING HYDROSYSTEMS OF STOPPING AND RESTARTING SOLID ROCKET MOTOR

The compilation of any calculation methodology and rational choice of the parameters of the control system of the propulsion system includes several stages, one of which is the transition from mathematical models presented in dimensional form to models using dimensionless variables. A computer study of a mathematical model of a combined automatic control system in a dimensionless form makes it possible to obtain a satisfactory quality of the transient process from the point of view of the person making the decision by varying the parameters of the regulators and choosing a range of their rational values and ratios. The article presents models of subsystems for regulating the pressure and amount of injection of liquid refrigerant into the combustion chamber using dimensionless variables and obtained during the analysis of the graphs of the transient processes of the system using an empirical method of selecting the desired parameters of the regulators. The result of a large number of computer experiments with a purposeful search for satisfaction of the management system of the main quality criteria was a table of values of the quality criteria for the regulatory system. The table shows the range of parameters of the executive devices of the control system of solid propellant, in which the autonomous region of the quality of the transient processes of one regulator is formed from the quality of the operation of another regulator, with previously given constant initial parameters of the regulators.

Keywords: solid rocket motor, liquid refrigerant, subsystem, combined control system for combustion extinction, dimensionless parameters, jet hydraulic steering machine, flow regulator.

Введение

Современный уровень развития методик расчета, моделирования и выбора параметров для последующего проектирования комбинированных систем автоматического регулирования (САР) твердотопливными двигательными установками (ТРДУ) на сегодняшний день характеризуется отсутствием результатов комплексных теоретических и экспериментальных исследований, необходимых для последующего поэтапного моделирования и создания новых видов

регулируемых двигательных установок. Математическое моделирование статических и динамических характеристик сложных технических объектов позволит снизить сроки и объемы доводочных работ и рассчитать степень и характер влияния эксплуатационных факторов на функционирование системообразующих элементов и объект в целом [1]. Одним из наиболее значимых аспектов численного моделирования является разработка математических моделей с использованием безразмерных переменных, позволяющих идентифицировать параметры и характеристики комбинированных электрогидравлических систем управления РДТТ. Введение безразмерных переменных при численном моделировании позволяет упростить процессы обработки, обобщения и анализа информации о параметрах и характеристиках, что значительно сокращает время тестирования и отладки математических моделей.

В рамках объекта исследований рассматривается комбинированная система управления гашением и подготовкой к повторному запуску ракетного двигателя твердого топлива, в которой выделены две подсистемы: а) подсистема регулирования давления в камере сгорания; б) подсистема регулирования количества впрыска жидкого хладагента в камеру сгорания в процессе гашения. В данной статье приведены математические модели каждой из подсистем в отдельности и комбинированной системы управления с использованием безразмерных переменных. Ранее в работе [2] были рассмотрены модели тех же подсистем и комбинированной САУ ТРДУ только в размерном виде.

Подсистема регулирования давления в камере сгорания

Основой для разработки математической модели подсистемы регулирования давления в камере сгорания с использованием безразмерных переменных послужила математическая модель в размерном виде, состоящая из системы уравнений (см. работу [2]), в которую входят: уравнение электрической цепи электромеханического преобразования (ЭМП); уравнение моментов ЭМП; уравнение баланса расходов; уравнение движения поршня (штока) гидроцилиндра; уравнения динамики внутренней баллистики (изменения свободного объема камеры сгорания и материального баланса камеры при изменении площади критического сечения сопла) [3–7].

Переход к уравнениям с использованием безразмерных переменных осуществляется путем введения представленных ниже равенств и делением всего уравнения на слагаемое для их получения в правой части [8]:

$$\bar{i}(t) = \frac{i(t)}{i_{\max}}, \quad (1)$$

где $\bar{i}(t)$ – функция силы тока в электрической цепи (безразмерная переменная); $i(t)$ – текущее значение силы тока в электрической цепи; i_{\max} – максимальное значение силы тока в электрической цепи, А;

$$\bar{y}(t) = \frac{y(t)}{y_{\max}}, \quad (2)$$

где $\bar{y}(t)$ – функция перемещения центрального тела сопла (безразмерная переменная); $y(t)$ – текущее значение перемещения центрального тела сопла, м; y_{\max} – максимальное перемещение центрального тела сопла, м;

$$\bar{\alpha}(t) = \frac{\alpha(t)}{\alpha_{\max}}, \quad (3)$$

где $\bar{\alpha}(t)$ – функция угла перемещения струйной трубки (безразмерная переменная); $\alpha(t)$ – текущее значение угла перемещения струйной трубки, рад; α_{\max} – максимальное значение угла перемещения струйной трубки, рад;

$$\bar{z}(t) = \frac{z(t)}{z_{\max}}, \quad (4)$$

где $\bar{z}(t)$ – функция перемещения струйной трубки (безразмерная переменная); $z(t)$ – текущее значение перемещения струйной трубки, м; z_{\max} – максимальное значение перемещения струйной трубки, м;

$$\bar{p}_d(t) = \frac{p_d(t)}{p_{d\max}}, \quad (5)$$

где $\bar{p}_d(t)$ – функция перепада давлений на гидроцилиндре (безразмерная переменная); $p_d(t)$ – текущее значение перепада давлений на гидроцилиндре, Па; $p_{d\max}$ – максимальное значение перепада давлений на гидроцилиндре, Па;

$$\bar{p}(t) = \frac{p(t)}{p_{\max}}, \quad (6)$$

где $\bar{p}(t)$ – функция давления в камере сгорания (безразмерная переменная); $p(t)$ – текущее значение давления в камере сгорания, Па; p_{\max} – максимальное значение давления в камере сгорания, Па;

$$\bar{V}_k(t) = \frac{V_k(t)}{V_{k\max}}, \quad (7)$$

где $\bar{V}_k(t)$ – функция объема камеры сгорания (безразмерная переменная); $V_k(t)$ – текущее значение объема камеры сгорания, м³; $V_{k\max}$ – максимальный объем камеры сгорания, м³.

С учетом введенных в математическую модель подсистемы регулирования давления в камере сгорания (см. работу [2]) безразмерных переменных (1)–(7) система уравнений принимает следующий вид:

- уравнение электрической цепи ЭМП

$$K_R \bar{i}(t) + K_L \frac{d\bar{i}(t)}{dt} + T_{ПЭ} \frac{d\bar{\alpha}}{dt} = \bar{U}_{\text{пост}}, \quad (8)$$

где K_R – коэффициент активного сопротивления обмотки управления электромагнита,

$K_R = R_{\text{пост}} \frac{i_{\max}}{U_{\max}}$; K_L – коэффициент индуктивности обмотки управления электромагнита,

$K_L = L_{\text{пост}} \frac{i_{\max}}{U_{\max}}$; $T_{ПЭ}$ – электромеханическая постоянная времени, учитывающая противоЭДС,

$T_{ПЭ} = K_{ПЭ} \frac{\alpha_{\max}}{U_{\max}}$; $\bar{U}_{\text{пост}}$ – функция напряжения электрической цепи постоянного тока (безраз-

мерный параметр); U_{\max} – максимальное значение напряжения электрической цепи, В;

- уравнение моментов электромеханического преобразователя

$$K_J^2 \frac{d^2 \bar{\alpha}(t)}{dt^2} + K_b \frac{d\bar{\alpha}(t)}{dt} + K_C \bar{\alpha}(t) + T_{m\alpha} \bar{\alpha}(t) = \bar{i}(t), \quad (9)$$

где K_J – коэффициент, учитывающий инерционность струйной трубки, $K_J = \sqrt{\frac{J \alpha_{\max}}{K_{mi} i_{\max}}}$;

K_C – коэффициент силы жесткости внешней центрирующей пружины, $K_C = \frac{c_{\text{пр}} \alpha_{\max}}{K_{mi} i_{\max}}$;

K_b – коэффициент, учитывающий трение ЭМП, $K_b = \frac{b_{np} \alpha_{max}}{K_{mi} i_{max}}$; $T_{m\alpha}$ – постоянная времени преобразователя, $T_{m\alpha} = \frac{K_{m\alpha} \alpha_{max}}{K_{mi} i_{max}}$;

- уравнение баланса расходов

$$K_A \frac{d\bar{y}(t)}{dt} + K_W \frac{d\bar{p}_d(t)}{dt} + T_{Qp} \bar{p}_d(t) = \bar{z}(t), \quad (10)$$

где K_A – коэффициент, учитывающий площадь поршня, $K_A = \frac{Ay_{max}}{K_{Qz} z_{max}}$; K_W – коэффициент,

учитывающий объем рабочей жидкости в полости камеры гидроцилиндра, $K_W = \frac{Wp_{dmax}}{2EK_{Qz} z_{max}}$;

T_{Qp} – постоянная времени, $T_{Qp} = \frac{K_{Qp} p_{dmax}}{K_{Qz} z_{max}}$;

- уравнение движения поршня (штока) гидроцилиндра

$$K_M^2 \frac{d^2 \bar{y}(t)}{dt^2} + \bar{R} + K_B \frac{d \bar{y}(t)}{dt} + K_c \bar{y}(t) = \bar{p}_d, \quad (11)$$

где K_M – коэффициент, учитывающий приведенную к штоку массу, $K_M = \sqrt{\frac{My_{max}}{Ap_{dmax}}}$; \bar{R} – ко-

эффициент статической нагрузки, $\bar{R} = \frac{R}{Ap_{dmax}}$; K_B – коэффициент вязкого демпфирования

в гидродвигателе, $K_B = \frac{by_{max}}{Ap_{dmax}}$; K_c – коэффициент силы жесткости пружины гидродвигателя,

$K_c = \frac{cy_{max}}{Ap_{dmax}}$;

- уравнение изменения свободного объема камеры [9–12]

$$\frac{d\bar{V}}{dt} = K_U \bar{p}(t), \quad (12)$$

где $\bar{V}_k(t)$ – функция объема камеры сгорания (безразмерная переменная), получаемая из равенства

$$\bar{V}_k(t) = \frac{V_k(t)}{V_{kmax}}, \quad (13)$$

где $V_k(t)$ – текущее значение объема камеры сгорания, м³; V_{kmax} – максимальное значение объема камеры сгорания, м³; K_U – коэффициент, учитывающий скорость горения заряда твердого

топлива, $K_U = \frac{Su(p_{max})^v}{V_{max}(p_a)^v}$; $\bar{p}(t)$ – давление в камере сгорания (безразмерная переменная), получающаяся из равенства

$$\bar{p}(t) = \frac{p(t)}{p_{max}}, \quad (14)$$

где $p(t)$ – текущее значение давления в камере сгорания, Па; p_{max} – максимальное значение давления в камере сгорания, Па;

• уравнение материального баланса камеры сгорания при изменении площади критического сечения сопла [9–12]:

$$\bar{V}(t) \left(\frac{d\bar{p}(t)}{dt} \right) + K_F \bar{p}(t) + K_S \bar{p}(t) = K_T, \quad (15)$$

где K_F – коэффициент, учитывающий изменение площади критического сечения сопла,

$K_F = \frac{\gamma \sqrt{RT} \mu_c A_n (F_* - f(y))}{V_{\max}}$; K_S – коэффициент, учитывающий изменение площади поверхности горения, $K_S = \frac{Su}{V_{\max}}$; K_T – коэффициент, учитывающий изменения температуры горения,

$K_T = \frac{\gamma RT_{oc} \chi_k S \rho_1 u}{V_{\max} p_{\max}}$.

Численное решение системы, состоящей из дифференциальных уравнений (8)–(15), проводилось на ЭВМ в математическом пакете Maple методом Рунге–Кутты 4–5-го порядка. Время тестирования и отладки математической модели подсистемы регулирования давления в камере сгорания после введения безразмерных переменных в целом сократилось почти на 20 %. Полученная безразмерная математическая модель подсистемы регулирования давления в камере сгорания, описываемая уравнениями (8)–(15), аналогична исходной модели (см. работу [2]), переходные процессы идентичны, однако расчет переходных процессов осуществляется с меньшими временными затратами, а выделение безразмерных переменных в математической модели упрощает выявление факторов, оказывающих влияние на качество переходных процессов.

Подсистема регулирования количества жидкого хладагента, впрыскиваемого в камеру сгорания

Основой для разработки математической модели подсистемы регулирования количества впрыска жидкого хладагента [13] с использованием безразмерных переменных послужила математическая модель в размерном виде, состоящая из системы уравнений (см. работу [2]), в которую входят: уравнение электрической цепи электромеханического преобразователя; уравнение движения управляющей заслонки дросселя; уравнение движения золотника клапана постоянного перепада давления; уравнение баланса расходов на форсуночном блоке; уравнение динамики внутренней баллистики (изменения свободного объема камеры сгорания и материального баланса камеры при впрыске жидкого хладагента) [2, 6, 7, 14, 15].

Переход от математической модели в размерном виде к безразмерной производится путем введения в систему уравнений безразмерных переменных: силы тока; перемещения управляющей заслонки дросселя; напряжения электрической цепи постоянного тока; перемещения золотника клапана постоянного перепада давления; давления на входе и на выходе из электромагнитного дросселя. С учетом введенных в математическую модель подсистемы регулирования впрыска жидкого хладагента (см. работу [2]) безразмерных переменных система уравнений принимает следующий вид:

• уравнение электрической цепи

$$K_{R_{др}} \bar{i}_{др}(t) + K_{L_{др}} \frac{d\bar{i}_{др}(t)}{dt} + T_{ПЭД} \frac{d\bar{x}(t)}{dt} = \bar{U}_{\text{пост}}, \quad (16)$$

где $K_{R_{др}}$ – коэффициент активного сопротивления обмотки управления электромагнита,

$K_{R_{др}} = R_{др} \frac{i_{др \max}}{U_{\max}}$; $\bar{i}_{др}(t)$ – функция силы тока в электрической цепи ЭМП (безразмерная переменная), получаемая из равенства

$$\bar{i}_{др}(t) = \frac{i_{др}(t)}{i_{др\max}}, \quad (17)$$

где $i_{др}(t)$ – текущее значение силы тока в электрической цепи ЭМП, А; $i_{др\max}$ – максимальное значение силы тока в электрической цепи ЭМП, А; $K_{Lдр}$ – коэффициент индуктивности обмотки управления электромагнита, $K_{Lдр} = L_{др} \frac{i_{др\max}}{U_{\max}}$; $T_{ПЭД}$ – электромеханическая постоянная времени, учитывающая противоЭДС, $T_{ПЭД} = K_{ПЭД} \frac{x_{\max}}{U_{\max}}$; $\bar{x}(t)$ – функция перемещения управляющей заслонки дросселя (безразмерная переменная), получаемая из равенства

$$\bar{x}(t) = \frac{x(t)}{x_{\max}}, \quad (18)$$

где $x(t)$ – текущее значение перемещения управляющей заслонки дросселя, м; x_{\max} – максимальное значение перемещения управляющей заслонки дросселя, м; $\bar{U}_{\text{пост}}$ – функция напряжения электрической цепи постоянного тока (безразмерный параметр), получаемая из равенства

$$\bar{U}_{\text{пост}} = \frac{U_{\text{пост}}}{U_{\max}}, \quad (19)$$

где $U_{\text{пост}}$ – текущее значение напряжения электрической цепи постоянного тока, В; U_{\max} – максимальное значение напряжения электрической цепи постоянного тока, В;

- уравнение движения управляющей заслонки дросселя

$$K_{мдр}^2 \frac{d^2 \bar{x}(t)}{dt^2} + K_{бдр} \frac{d\bar{x}(t)}{dt} + K_{Сдр} \bar{x}(t) = \bar{i}_{др}(t), \quad (20)$$

где $K_{мдр}$ – коэффициент, учитывающий инерционность заслонки дросселя, $K_{мдр} = \sqrt{\frac{m_{др} x_{\max}}{K_{фД} i_{др\max}}}$;

$K_{Сдр}$ – коэффициент силы жесткости центрирующей пружины, $K_{Сдр} = \frac{c_{др} x_{\max}}{K_{фД} i_{др\max}}$; $K_{бдр}$ –

коэффициент, учитывающий трение дросселя, $K_{бдр} = \frac{b_{др} x_{\max}}{K_{фД} i_{др\max}}$;

- уравнение движения золотника клапана постоянного перепада давления

$$K_{мк}^2 \frac{d^2 \bar{y}_к(t)}{dt^2} + K_{бк} \frac{d\bar{y}_к(t)}{dt} + K_{Ск} \bar{y}_к(t) + \bar{p}_3(t) = \bar{p}_2(t), \quad (21)$$

где $K_{мк}$ – коэффициент, учитывающий инерционность золотника клапана постоянного перепада давления, $K_{мк} = \sqrt{\frac{m_{к} y_{к\max}}{A_1 p_{2\max}}}$; $\bar{y}_к(t)$ – функция перемещения золотника клапана постоянного перепада давления (безразмерная переменная), получаемая из равенства

$$\bar{y}_к(t) = \frac{y_к(t)}{y_{к\max}}, \quad (22)$$

где $y_к(t)$ – текущее значение перемещения золотника клапана постоянного перепада давления, м, $y_{к\max}$ – максимальное значение перемещения золотника клапана постоянного перепада, м;

K_{bk} – коэффициент, учитывающий трение золотника клапана постоянного перепада давления, $K_{bk} = \frac{b_{vk} y_{kmax}}{A_1 p_{2max}}$; K_{Ck} – коэффициент, учитывающий силу жесткости центрирующей пружины

клапана постоянного перепада давления, $K_{Ck} = \frac{c_k y_{kmax}}{A_1 p_{2max}}$; $\bar{p}_3(t)$ – функция давления на выходе из электромагнитного дросселя (безразмерная переменная), получаемая из равенства

$$\bar{p}_3(t) = \frac{p_3(t)}{p_{3max}}, \quad (23)$$

где $p_3(t)$ – текущее значение давление на выходе из электромагнитного дросселя, Па; p_{3max} – максимальное значение давления на выходе из электромагнитного дросселя, Па; $\bar{p}_2(t)$ – функция давления на входе в электромагнитный дроссель (безразмерная переменная), получаемая из равенства

$$\bar{p}_2(t) = \frac{p_2(t)}{p_{2max}}, \quad (24)$$

где $p_2(t)$ – текущее значение давления на входе в электромагнитный дроссель (на выходе из клапана постоянного перепада давления), Па; p_{2max} – максимальное значение давления на входе в электромагнитный дроссель (на выходе из клапана постоянного перепада давления), Па;

- уравнение баланса расходов регулятора

$$K_A \frac{d\bar{y}_k(t)}{dt} + K_W \frac{d\bar{p}_2}{dt} = \sqrt{1 - \bar{p}_2(t)} - \sqrt{\bar{p}_2(t) - \bar{p}_3(t)}, \quad (25)$$

где K_A – коэффициент, учитывающий площадь золотника клапана постоянного перепада давления, $K_A = \frac{A y_{kmax}}{\mu f \sqrt{\frac{2p_1}{\rho_j}}}$; K_W – коэффициент, учитывающий объем рабочей полости клапана по-

стоянного перепада давления, $K_W = \frac{W_0}{2E\mu f \sqrt{\frac{2p_1}{\rho}}} p_1$;

- уравнение баланса расходов на форсуночном блоке

$$\sqrt{\bar{p}_2(t) - \bar{p}_3(t)} = \sqrt{\bar{p}_3(t)} + K_W \frac{d\bar{p}_3}{dt}. \quad (26)$$

Уравнения изменения внутрикамерного объема и материального баланса камеры сгорания при впрыске жидкого хладагента выглядят так же, как для подсистемы регулирования внутрикамерного давления методом изменения площади критического сечения сопла. Численное решение системы, состоящей из уравнений (16)–(26), проводилось на ЭВМ в математическом пакете Maple методом Рунге–Кутты–Фальберга 4–5-го порядка. Время тестирования и отладки математической модели подсистемы регулирования впрыска жидкого хладагента после введения безразмерных переменных в целом сократилось почти на 20 %. Полученная безразмерная математическая модель подсистемы регулирования количества жидкого хладагента, впрыскиваемого в камеру сгорания, описываемая уравнениями (16)–(26), аналогична исходной модели (см. работу [2]), переходные процессы идентичны, однако расчет переходных процессов осуществляется с меньшими временными затратами, а выделение безразмерных переменных в математической модели упрощает выявление факторов, оказывающих влияние на качество переходных процессов.

Комбинированная система управления модулем тяги (гашением) и подготовки к повторному запуску ракетного двигателя твердого топлива

На данной стадии исследований использовался эмпирический метод подбора искомых параметров регуляторов при постоянном анализе системы. Исследование на ЭВМ полной математической модели комбинированной САУ в безразмерном виде позволяет получить удовлетворительное с точки зрения лица, принимающего решения, качество переходного процесса путем варьирования параметров регуляторов и выбора диапазона их рациональных значений и соотношений [8]. При проведении вычислительных экспериментов рассматривался один и тот же алгоритм управления САУ РДТТ. В момент времени 1 с, при достижении минимально необходимого уровня внутрикамерного давления, регулятор расхода количества жидкого хладагента должен уменьшить расход, впрыскиваемый в камеру сгорания. Необходимое значение расхода устанавливается через 0,1 с после отработки исполнительным механизмом регулятора впрыска жидкого хладагента управляющего воздействия. При совместной работе регулятора расхода (РР) и струйной гидравлической рулевой машины (СГРМ) устанавливаются необходимые значения физических величин, определяющих работу ракетно-двигательной установки (давление в камере сгорания, скорость горения заряда твердого топлива (ТТ) и газоприход). На рис. 1–3 показаны графики переходных процессов комбинированной системы управления модулем тяги (гашением) и подготовки к повторному запуску ракетного двигателя твердого топлива.

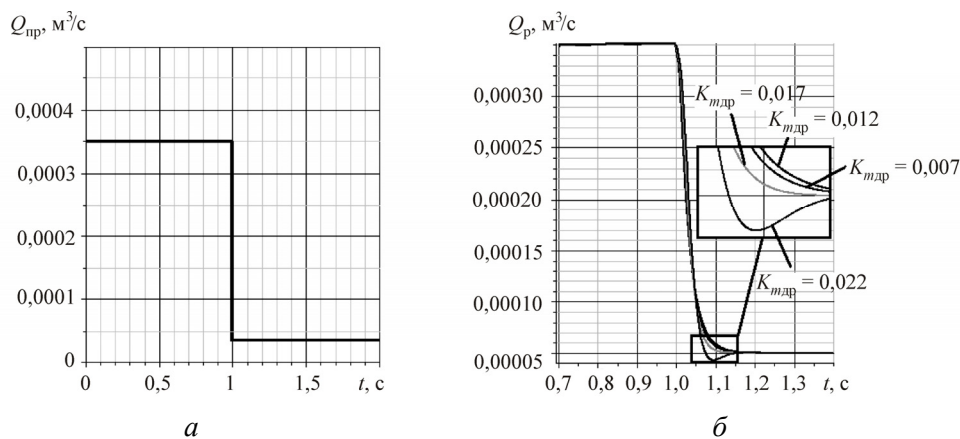


Рис. 1. Характеристики комбинированной системы управления модулем тяги (гашением) и подготовки к повторному запуску РДТТ в безразмерном виде: *a* – программа управления расходом жидкого хладагента; *б* – изменение расхода хладагента

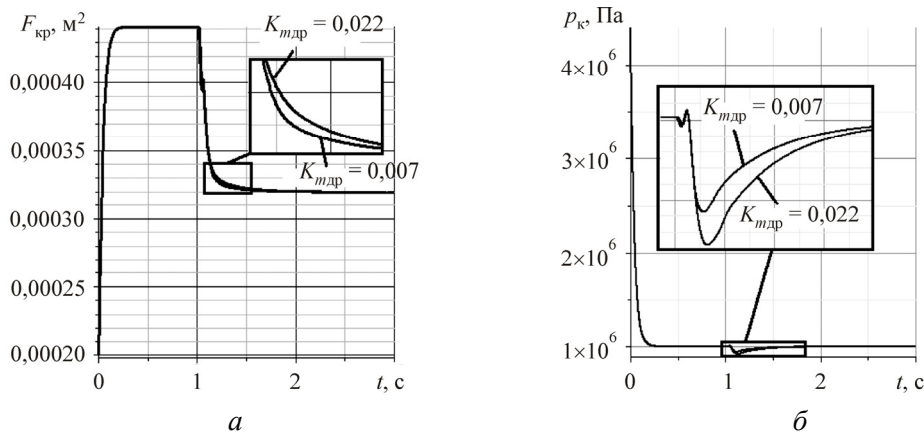


Рис. 2. Характеристики комбинированной системы управления модулем тяги (гашением) и подготовки к повторному запуску РДТТ в безразмерном виде: *a* – изменение площади критического сечения сопла; *б* – изменение давления в камере сгорания

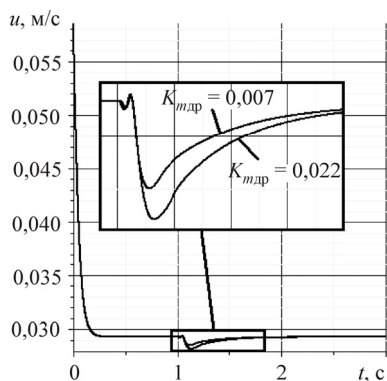


Рис. 3. Скорость горения заряда ТТ в комбинированной системе управления модулем тяги (гашением) и подготовки к повторному запуску РДТТ в безразмерном виде

Результатом большого числа машинных экспериментов при целенаправленном поиске удовлетворения системы управления основным критериям качества явилась таблица значений критериев качества системы регулирования. В таблице представлен диапазон параметров исполнительных устройств системы регулирования РДТТ, в котором образуется область автономности качества переходных процессов одного регулятора от качества работы другого регулятора при ранее заданных постоянных параметрах регуляторов.

Критерии качества комбинированной системы управления РДТТ

Безразмерные параметры РР и СГРМ	Диапазон изменения параметров	Время первого выхода на режим, с	Динамическая ошибка, %	Статическая ошибка, %
$K_{бдр}$	0,04–0,0436	0,03–0,05	4–6	≤ 2
$K_{тк}$	4,12–16,12	0,04	6	≤ 2
$K_{Ск}$	$1,6 \cdot 10^7$ – $1,96 \cdot 10^7$	0,02–0,05	4–6	≤ 2
$K_{мдр}$	0,007–0,022	0,04–0,045	6–8	≤ 2
K_A	0,0064–0,03 при $K_A > 0,015$ число колебаний > 5	0,05–0,03	3–7	≤ 3
K_b	0,001–0,0028	0,08–0,04	3–15	≤ 3
K_C	0,97–0,982 при $K_C > 0,982$ число колебаний > 5	0,08–0,03	3–6	≤ 3
$T_{та}$	0,029–0,03 при $T_{та} > 0,3$ число колебаний > 5	0,07–0,03	3–6	≤ 3
T_{Qp}	0,95–0,98 при $T_{Qp} > 0,98$ число колебаний > 5	0,15–0,03	2–6	≤ 3

Заключение

По результатам проведенных расчетов и анализа графиков переходных процессов можно сделать следующие выводы:

1. Время тестирования и отладки математических моделей подсистем регулирования давления и количества жидкого хладагента, впрыскиваемого в камеру сгорания, после введения безразмерных переменных в целом сократилось почти на 20 %. Полученные безразмерные математические модели подсистем аналогичны исходным моделям (см. работу [2]), переходные процессы идентичны, однако расчет осуществляется с меньшими временными затратами, а выделение безразмерных переменных в математической модели упрощает выявление факторов, оказывающих влияние на качество переходных процессов.

2. Для предлагаемой комбинированной системы управления модулем тяги (гашением) и подготовки к повторному запуску ракетного двигателя твердого топлива получен диапазон безразмерных параметров исполнительных устройств САР РДТТ (см. таблицу), в котором образуется область автономности качества переходных процессов одного регулятора от качества работы другого регулятора при ранее заданных постоянных параметрах регуляторов.

Библиографический список

1. Опыт разработки комбинированного РДТТ многократного включения / И.А. Кривошеев, В.А. Целищев, А.Б. Бачурин, Е.В. Стрельников // Вестник УГАТУ. – 2012. – Т. 16, № 2(47). – С. 174–188.
2. Бачурин А.Б., Стрельников Е.В., Целищев В.А. Моделирование процессов в электрогидравлической системе управления гашением и повторным запуском ракетного двигателя твердого топлива // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2016. – № 46 – С. 88–107.
3. Система автоматического регулирования давления в камере сгорания РДТТ / А.Б. Бачурин, Е.В. Стрельников, Е.С. Литвинов, В.А. Целищев // Вестник УГАТУ. – 2013. – Т. 17, № 3(56). – С. 26–33.
4. Месропян А.В., Целищев В.А. Моделирование гидравлических рулевых машин. – Уфа: Изд-во Уфим. гос. авиац. техн. ун-та, 2008. – 211 с.
5. Экспериментальные и теоретические исследования в регулируемых соплах с центральным телом / В.А. Целищев, А.Б. Бачурин, Е.В. Стрельников, А.М. Русак // Вестник УГАТУ. – 2010. – Т. 14, № 5(40). – С. 52–61.
6. Электрогидравлическая система управления гашением твердотопливной двигательной установки / А.Б. Бачурин, Е.В. Стрельников, Е.С. Литвинов, В.А. Целищев // Вестник УГАТУ. – 2015. – Т. 19, № 3(69). – С. 81–91.
7. Бачурин А.Б., Стрельников Е.В., Целищев В.А. Моделирование процессов в электрогидравлической системе управления гашением и повторным запуском ракетного двигателя твердого топлива // Динамика и виброакустика / Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. акад. С.П. Королева. – Самара, 2015. – Т. 2, № 2. – С. 6–15.
8. Сунарчин Р.А. Выбор параметров гидромеханических регуляторов авиационных двигателей. Анализ и синтез гидромеханических регуляторов: учеб. пособие. – Уфа: Изд-во Уфим. гос. авиац. техн. ун-та, 2005. – 87 с.
9. Управляемые энергетические установки на твердом топливе / В.И. Петренко, М.И. Соколовский, Г.А. Зыков, С.В. Лянгузов, А.И. Тодощенко, В.Л. Попов, Б.Ф. Потапов, В.В. Севастьянов, С.Г. Ярушин. – М.: Машиностроение, 2003. – 464 с.
10. Присняков В.Ф. Динамика ракетных двигателей твердого топлива: учеб. пособие для вузов. – М.: Машиностроение, 1984. – 248 с.
11. 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; КБ им. акад. В.П. Макеева. – Миасс, 1996. – 295 с.
12. Волков Е.Б., Сырицын Т.А., Мазинг Г.Ю. Статика и динамика ракетных двигательных установок. Кн. 1. Статика. – М.: Машиностроение, 1978. – 224 с.
13. Старостенко В.Г. Пневмогидравлические системы энергоустановок: учеб. пособие / КБ им. акад. В.П. Макеева. – Миасс, 2006. – 260 с.
14. Целищев В.А., Русак А.М. Исследование системы автоматического регулирования РДТТ // Газоструйные импульсные системы / Иж. гос. техн. ун-т. – Ижевск, 2003. – Т. 1. – С. 59–80.
15. Ерохин Б.Т. Теория внутрикамерных процессов и проектирование РДТТ. – М.: Машиностроение, 1991. – 560 с.

References

1. Krivosheev I.A., Tselishchev V.A., Bachurin A.B., Strelnikov E.V. Opyt razrabotki kombinirovannogo RDТТ mnogokratnogo vklyucheniya [Experience of development combined SRM with multiple starting]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, vol. 16, no. 2(47), pp. 174–188.
2. Bachurin A.B., Strelnikov E.V., Tselishchev V.A. Modelirovanie processov v jelektrogidravlicheskoj sisteme upravleniya gasheniem i povtornym zapuskom raketnogo dvigatelya tverdogo topliva [Modeling of

processes in the electrohydraulic control system for quenching and restarting a rocket engine for solid fuel]. *Vestnik Permskogo nacionalnogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Ajerokosmicheskaya tekhnika*. Perm, 2016, no. 46, pp. 88-107.

3. Bachurin A.B., Strel'nikov E.V., Litvinov E.S., Tselishchev V.A. Sistema avtomaticheskogo regulirovaniya davleniya v kamere sgoraniya RDTT [Automatic system for controlling the pressure in the SRM combustion chamber]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, vol. 17, no. 3(56), pp. 26-33.

4. Mesropyan A.V., Tselishchev V.A. Modelirovanie gidravlicheskih rulevykh mashin [Modeling hydraulic steering gears]. *Ufimskiy gosudarstvennyy aviatsionnyy tekhnicheskii universitet*, 2008. 211 p.

5. Tselishchev V.A., Bachurin A.B., Strel'nikov E.V., Rusak A.M. Eksperimentalnye i teoreticheskie issledovaniya v reguliruemyykh soplakh s tseentralnym telom [Experimental and theoretical studies in regulated nozzles with a central body]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2010, vol. 14, no. 5(40), pp. 52-61.

6. Bachurin A.B., Strel'nikov E.V., Litvinov E.S., Tselishchev V.A. Jelektrogidravlicheskaja sistema upravlenija gasheniem tverdotoplivnoj dvigatel'noj ustanovki [Electrohydraulic control system for quenching of a solid propulsion system]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2015, vol. 19, no. 3(69), pp. 81-91.

7. Bachurin A.B., Strel'nikov E.V., Tselishchev V.A. Modelirovanie processov v jelektrogidravlicheskoj sisteme upravleniya gasheniem i povtornym zapuskom raketnogo dvigatelya tverdogo topliva [Modeling of processes in the electrohydraulic control system for quenching and restarting a rocket engine for solid fuel]. *Dynamics and Vibroacoustics*. Samara State Aerospace University S.P. Korolev. Samara, 2015, vol. 2, no. 2, pp. 6-15.

8. Sunarchin R.A. Vybor parametrov gidromechanicheskikh reguljatorov aviacionnykh dvigatelej. Analiz i sintez gidromechanicheskikh reguljatorov [Selection of the parameters of hydromechanical regulators of aircraft engines. Analysis and synthesis of hydromechanical regulators]. Ufa. Ufimskiy gosudarstvennyy aviatsionnyy tekhnicheskii universitet, 2005. 87 p.

9. Petrenko V.I., Sokolowski M.I., Zikov G.A., Lyanguzov S.V., Todoschenko A.I., Popov V.L., Potapov B.F., Sevast'yanov V.V., Yarushin S.G. Upravlyenie energeticheskimi ustanovkami na tverdom toplive [Controlled power plants for solid propellants]. Moscow: Mashinostroenie, 2003. 464 p.

10. Prisnyakov V.F. Dinamika raketnykh dvigateley tverdogo topliva [Dynamics of solid rocket motors]. Moscow: Mashinostroenie, 1984. 248 p.

11. Zezin V.G., Petrenko V.I., Popov V.L., Rusak A.M., Savchenko V.I., Simonov E.A., Feofilaktov V.I. Reguliruemye tverdotoplivnye dvigatelnye ustanovki [Controlled solid propulsion systems]. Miass, 1996. 295 p.

12. Volkov E.B., Syritsyn T.A., Masing G.Yu. Statika i dinamika raketnykh dvigatelnykh ustanovok. Kniga 1. Statika [Statics and dynamics of rocket propulsion. Book 1. Statics]. Moscow: Mashinostroenie, 1978. 224 p.

13. Starostenko V.G. Pnevmo gidravlicheskie sistemy ehnergoustanovok [Pneumohydraulic system of power plants]. Miass, 2006. 260 p.

14. Tselishchev V.A., Rusak A.M. Issledovanie sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya RDTT [Research of the SRM automatic regulation system]. *Gasostruynye impulsnyye sistemy*, 2003. vol. 1, pp. 59-80.

15. Erokhin B.T. Teoriya vnutrikamernykh protsessov i proektirovanie RDTT [The theory of chamber processes and designing SRM]. Moscow: Mashinostroenie, 1991. 560 p.

Об авторах

Бачурин Александр Борисович (Уфа, Россия) – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Прикладная гидромеханика» Уфимского государственного авиационного технического университета (450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12, e-mail: bachurinsasha1987@mail.ru).

Стрельников Евгений Владимирович (Уфа, Россия) – аспирант кафедры «Прикладная гидромеханика» Уфимского государственного авиационного технического университета (450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12, e-mail: e_strelnikov@mail.ru).

Целищев Владимир Александрович (Уфа, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Прикладная гидромеханика» Уфимского государственного авиационного технического университета (450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12, e-mail: pgl.ugatu@mail.ru).

About the authors

Aleksandr B. Bachurin (Ufa, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Senior Lecturer, Applied Hydromechanics Department, Ufa State Aviation Technical University (12, K. Marx st., Ufa, 450000, Russian Federation, e-mail: bachurinsasha1987@mail.ru).

Evgeny V. Strelnikov (Ufa, Russian Federation) – Postgraduate Student, Applied Hydromechanics Department, Ufa State Aviation Technical University (12, K. Marx st., Ufa, 450000, Russian Federation, e-mail: e_strelnikov@mail.ru).

Vladimir A. Tselishchev (Ufa, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Applied Hydromechanics Department, Ufa State Aviation Technical University (12, K. Marx st., Ufa, 450000, Russian Federation, e-mail: pgl.ugatu@mail.ru).

Получено 05.07.2017