

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЯГИ И СООТНОШЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ТОПЛИВА СОВРЕМЕННЫХ ЖРД ПРОИЗВОДСТВА ОАО "НПО ЭНЕРГОМАШ"

Дмитрий Сергеевич Пушкарёв, инженер-конструктор ОАО "НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко"

В статье освещено совершенствование систем управления и регулирования тяги и соотношения компонентов топлива двигателей семейства РД170 (РД170, РД171, РД171М, РД180, РД191). К настоящему времени разработаны алгоритмы управления и регулирования двигателями, которые учитывают влияние нескольких внешних факторов (температуры, плотности и входные давления компонентов топлива) на точность обеспечения режима по тяге и соотношению расходов компонентов топлива.

The modernization of control systems of the RD170 engine family (RD170, RD171, RD171M, RD180, RD191) is showed in this article. The JSC "NPO Energomash" has developed algorithms of control that include the influence of several external factors (temperatures, densities and input pressures of components) on the thrust and the mixture ratio.

Ключевые слова: управление, регулирование, внешние факторы, тяга, соотношение расходов компонентов топлива.

Keywords: engine control, external factor, thrust, mixture ratio.

Настоящая статья является результатом более чем тридцатилетнего опыта отработки мощных кислородно-керосиновых ЖРД РД170 (РД171) и РД171М для ракет-носителей (РН) "Энергия" и РН "Зенит", РД180 для РН "Атлас", РД191 для РН "Ангара".

Создание в 80-х годах прошлого века мощных маршевых двигателей РД170 и РД171 для РН "Энергия" и РН "Зенит", с высоким уровнем энергетических характеристик (тяга в пустоте - 806,4 тс; давление в камере сгорания - 250 кгс/см²) потребовало высокой точности настройки и регулирования - погрешность обеспечения режимов по тяге и соотношению компонентов не должна была превышать по техническому заданию (ТЗ) 2...3 %. Для обеспечения таких требований была разработана уникальная система регулирования с внутридвигательными обратными связями, замкнутыми на своеобразный "гидравлический компьютер" - регулятор командных давлений, который по командам системы управления (СУ) РН или стеновой СУ управляет режимом работы двигателя по тяге и соотношению компонентов (подробно описано в [1]).

Отличительной особенностью системы регулирования двигателей РД170 (РД171) являлось наличие внутридвигательных гидро-

механических обратных связей по давлению перед смесительной головкой одной из четырёх камер (характеризует уровень тяги двигателя) и по перепаду давления на мерном устройстве в магистрали горючего (поз. 12 рис. 1) (характеризует расход горючего через камеры двигателя). На рис. 1 представлена пневмогидравлическая схема двигателя РД171.

Основными агрегатами системы регулирования являлись:

- регулятор расхода горючего на магистрали питания газогенератора со следящим приводом (поз. 15 и 17 рис. 1);
- дроссель горючего на магистрали питания камеры со следящим приводом (поз. 13 и 18 рис. 1);
- регулятор командных давлений с двумя цифровыми приводами (поз. 16, 22 и 23 рис. 1);
- мерное устройство;
- два дросселя окислителя с цифровыми приводами (поз. 6, 20 и 21 рис. 1).

Разработанная система регулирования двигателей РД170 (РД171) показала высокую эффективность по воспроизведению значений тяги и соотношения компонентов топлива с требуемой в

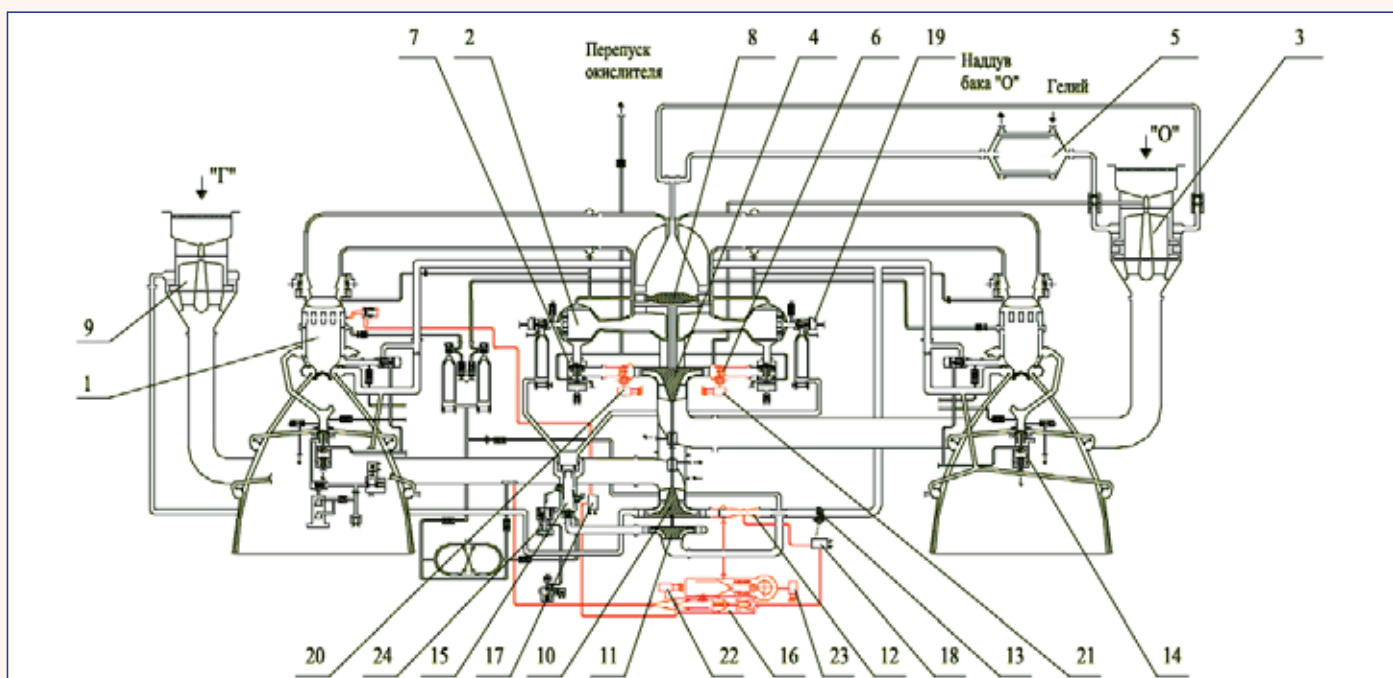


Рис. 1 Пневмогидравлическая схема двигателя РД171: 1 - камера сгорания, 2 - газогенератор, 3 - бустерный насосный агрегат (БНА) окислителя, 4 - насос окислителя, 5 - теплообменник, 6 - дроссель окислителя, 7 - клапан, 8 - турбина, 9 - БНА горючего, 10 - I ступень насоса горючего, 11 - II ступень насоса горючего, 12 - мерное устройство, 13 - дроссель горючего, 14 - клапан, 15 - регулятор расхода, 16 - регулятор командных давлений, 17 - привод регулятора тяги, 18 - привод дросселя горючего, 19 - клапан, 20, 21 - привод дросселя окислителя, 22, 23 - привод регулятора командных давлений, 24 - пневмопривод

ТЗ точно. Однако следует отметить, что, несмотря на эффективное управление двигателем, система характеризуется сложностью задействованных агрегатов и, как следствие, привносит повышенные требования к обеспечению надежного функционирования всех составляющих элементов. Высокой сложностью характеризуется и алгоритм управления двигателем.

Для повышения надежности двигателя, уменьшения количества агрегатов системы управления и регулирования двигателя и, как следствие, снижения его массы была предложена новая схема управления и регулирования двигателем без внутриводительных гидравлических обратных связей (рис. 2) (на рис. 1 красным цветом выделены исключенные составляющие системы управления и регулирования).

В процессе отработки усовершенствованного двигателя РД171М было подтверждено, что запуск и останов двигателя, а также его работа на всех предусматриваемых режимах характеризуется устойчивой работой всех агрегатов и систем. При этом обеспечивался заданный в ТЗ закон изменения тяги при запуске и останове. Упрощение системы (управляющие и регулирующие органы двигателя РД171М: регулятор тяги (поз. 1 на рис. 2) и дроссель горючего (поз. 2 на рис. 2), безусловно, увеличило надежность двигателя, но в тоже время потребовалось разработать новый алгоритм настройки двигателя, отвечающий требованиям ТЗ по точности управления и регулирования.

Наиболее полно алгоритм управления и регулирования двигателем, основные положения которого используются в алгоритмах управления и регулирования других двигателей (РД171М и РД191), был отработан на двигателях РД180. В нем предусмотрены решения, обеспечивающие максимальное приближение задаваемых СУ РН и реализуемых системой управления и регулирования двигателя значений тяги и соотношения расходов компонентов топлива, а также снижение риска выхода на нерасчетные режимы работы в результате случайных отклонений в системе управления и регулирования.

Применительно к товарным двигателям РД180 положение усложняется тем, что огневое приемо-сдаточное испытание (контрольно-технологическое (КТИ) двигателей проводится на горючем РГ-1, а последующая эксплуатация на горючем РР-1, отличающемся от РГ-1 по плотности и по характеру влияния температуры

на тягу и соотношение расходов компонентов.

В этой связи была разработана программа испытаний, в частности, двигателей РД180 по определению зависимостей, учитывающих влияние температур компонентов на входе в двигатель и плотностей компонентов на точность обеспечения требуемых значений тяги и соотношения расходов компонентов.

Для двигателя требуется определить зависимости, по которым СУ должны задаваться положения регулирующих органов в зависимости от заданных уровней режима по тяге и соотношению компонентов топлива. На эти зависимости значительно влияют внутренние факторы, такие как особенности изготовления агрегатов двигателя. Поэтому каждый экземпляр двигателя имеет свои собственные зависимости величин тяги и соотношения компонентов от положения исполнительных механизмов агрегатов системы управления и регулирования. Однако кроме внутренних факторов на положения регулирующих органов существенно влияют внешние факторы, такие как температуры компонентов и их плотности.

В процессе КТИ происходит, так называемая, настройка двигателя, в процессе которой определяются коэффициенты полиномов A_i, B_i, C_i, D_i , учитывающие влияние внутренних факторов.

Методика определения влияния внешних факторов заключается в следующем: для установления зависимостей, учитывающих влияние внешних факторов, используется один из двигателей РД180, прошедший огневое испытание (ОИ). Исходными данными для расчета влияния, например, температур являются значения температур окислителя t_{O_1} и горючего $t_{Г_1}$ на входе в двигатель и положения валов приводов регулятора и дросселя горючего, при которых в процессе испытания на определенных режимах R обеспечивалось номинальное значение соотношения компонентов ($K_{m_{ном}}$). Проводятся два ОИ, отличающиеся от первого ОИ температурами компонентов: $t_{O_2}, t_{Г_2}$ и $t_{O_3}, t_{Г_3}$. В каждом из испытаний двигатель выводится на режимы, которые определяются установкой положений приводов регулятора тяги и дросселя горючего, идентичным положениям на КТИ, на которых обеспечивались указанные выше режимы и $K_m = K_{m_{ном}}$.

По результатам испытаний по представленной ниже методике определяются коэффициенты, учитывающие влияние температур компонентов топлива.

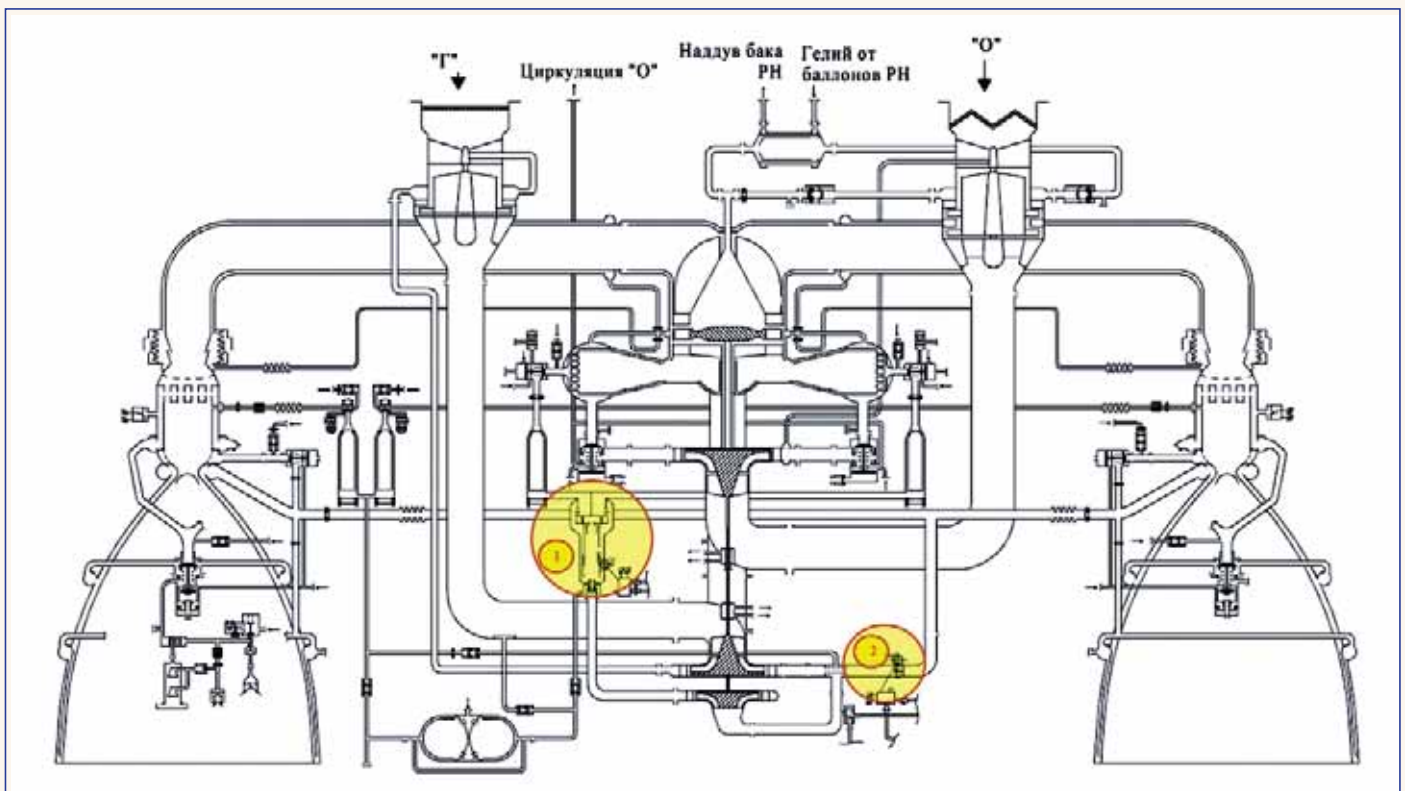


Рис. 2 Пневмогидравлическая схема двигателя РД171М

$$\beta_1 = \frac{\partial R}{\partial t_O} = \frac{\Delta R_{t_1} \cdot \Delta t_{t_2} - \Delta R_{t_2} \cdot \Delta t_{t_1}}{\Delta t_{O_1} \cdot \Delta t_{t_2} - \Delta t_{O_2} \cdot \Delta t_{t_1}};$$

$$\beta_2 = \frac{\partial R}{\partial t_\Gamma} = \frac{\Delta R_{t_2} \cdot \Delta t_{O_1} - \Delta R_{t_1} \cdot \Delta t_{O_2}}{\Delta t_{O_1} \cdot \Delta t_{t_2} - \Delta t_{O_2} \cdot \Delta t_{t_1}};$$

$$\beta_3 = \frac{\partial Km}{\partial t_O} = \frac{\Delta Km_{t_1} \cdot \Delta t_{t_2} - \Delta Km_{t_2} \cdot \Delta t_{t_1}}{\Delta t_{O_1} \cdot \Delta t_{t_2} - \Delta t_{O_2} \cdot \Delta t_{t_1}};$$

$$\beta_4 = \frac{\partial Km}{\partial t_\Gamma} = \frac{\Delta Km_{t_2} \cdot \Delta t_{O_1} - \Delta Km_{t_1} \cdot \Delta t_{O_2}}{\Delta t_{O_1} \cdot \Delta t_{t_2} - \Delta t_{O_2} \cdot \Delta t_{t_1}};$$

где:

$$\Delta t_{O_1} = t_{O_2} - t_{O_1}; \quad \Delta t_{O_2} = t_{O_3} - t_{O_1};$$

$$\Delta t_{t_1} = t_{t_2} - t_{t_1}; \quad \Delta t_{t_2} = t_{t_3} - t_{t_1};$$

$$\Delta R_{t_1} = R_{t_2} - R_{t_1}; \quad \Delta R_{t_2} = R_{t_3} - R_{t_1};$$

$$\Delta Km_{t_1} = Km_{t_2} - Km_{t_1}; \quad \Delta Km_{t_2} = Km_{t_3} - Km_{t_1};$$

По данным значениям β_i , полученных для различных режимов, определяются полиномы второй степени, аппроксимирующие эти значения в зависимости от уровня режима тяги двигателя

$$\beta_1(R) = \sum_{i=0}^2 E_i \cdot R^i; \quad \beta_2(R) = \sum_{i=0}^2 F_i \cdot R^i;$$

$$\beta_3(R) = \sum_{i=0}^2 G_i \cdot R^i; \quad \beta_4(R) = \sum_{i=0}^2 H_i \cdot R^i;$$

где E_i, F_i, G_i, H_i - коэффициенты, принимаемые постоянными для всех двигателей РД180.

Данные зависимости позволяют вводить температурные поправки на положение валов приводов регулятора и дросселя горючего для всех двигателей данной конструкции (в данном случае, двигателей РД180) и далее используются в алгоритме управления и регулирования двигателем в полете и при проведении последующих испытаний.

Методика учета влияния плотности практически аналогична методике учета влияния температур.

Также был разработан новый алгоритм управления и регули-

рования двигателем в полете, который учитывал влияние температур и плотностей компонентов и обеспечил требуемую точность, заданную в ТЗ

$$\Delta Km = Km - Km_{ном};$$

$$\Delta t_\Gamma = t_\Gamma - t_{\Gamma ном};$$

$$\Delta t_O = t_O - t_{O ном};$$

$$\Delta R_1 = \beta_1 \Delta t_\Gamma + \beta_3 \Delta t_O + \varepsilon_1 \Delta \rho_\Gamma;$$

$$\Delta Km_1 = \beta_2 \Delta t_\Gamma + \beta_4 \Delta t_O + \varepsilon_2 \Delta \rho_\Gamma;$$

$$R_1 = R - \Delta R_1;$$

$$\alpha_1 = \sum_{i=0}^2 A_i \cdot R_1^i + (\Delta Km - \Delta Km_1) \cdot \sum_{i=0}^2 C_i \cdot R_1^i;$$

$$\alpha_2 = \sum_{i=0}^2 B_i \cdot R_1^i + (\Delta Km - \Delta Km_1) \cdot \sum_{i=0}^2 D_i \cdot R_1^i.$$

Обозначения:

Km - задаваемое СУ РН соотношение компонентов;
 $Km_{ном} = 2,72$;
 $t_{\Gamma ном} = 20^\circ C$; $t_{O ном} = -179^\circ C$;
 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ - полиномы учитывающие влияние плотности горючего;
 R - уровень тяги, задаваемый СУ РН или стендовой СУ;
 α_1, α_2 - угол положения вала привода регулятора тяги и дросселя горючего.

Найденные в процессе расчета углы α_1 и α_2 позволяют вывести двигатель на заданные режимы с высокой точностью, погрешность составляет до $\sim \pm 1\%$.

При разработке двигателя РД191 для РН "Ангара" в качестве приводов регулятора и дросселя используются не цифровые приводы (установленные на двигателях РД171М, РД180), а шаговые электрогидроприводы (разработчик ОАО "ЦНИИАГ"), которые существенно упростили конструкцию двигателя и уменьшили его массу на 38 кг (масса шагового привода 3 кг, цифрового привода 22 кг). При их использовании в алгоритме управления и регулирования двигателем использованы зависимости кодов команд от задаваемых уровней режимов по тяге и соотношению расходов компонентов топлива. В шаговых электрогидроприводах используется шаговый двигатель, который обеспечивает 241 дискретное положение выходного вала привода. Каждому положению присвоен код N от 0 до 241 [2].

Двигатель РД191 по требованию ТЗ должен работать в широком диапазоне режимов по тяге 30...105%. В результате отработки конструкции двигателя было установлено, что на режимах

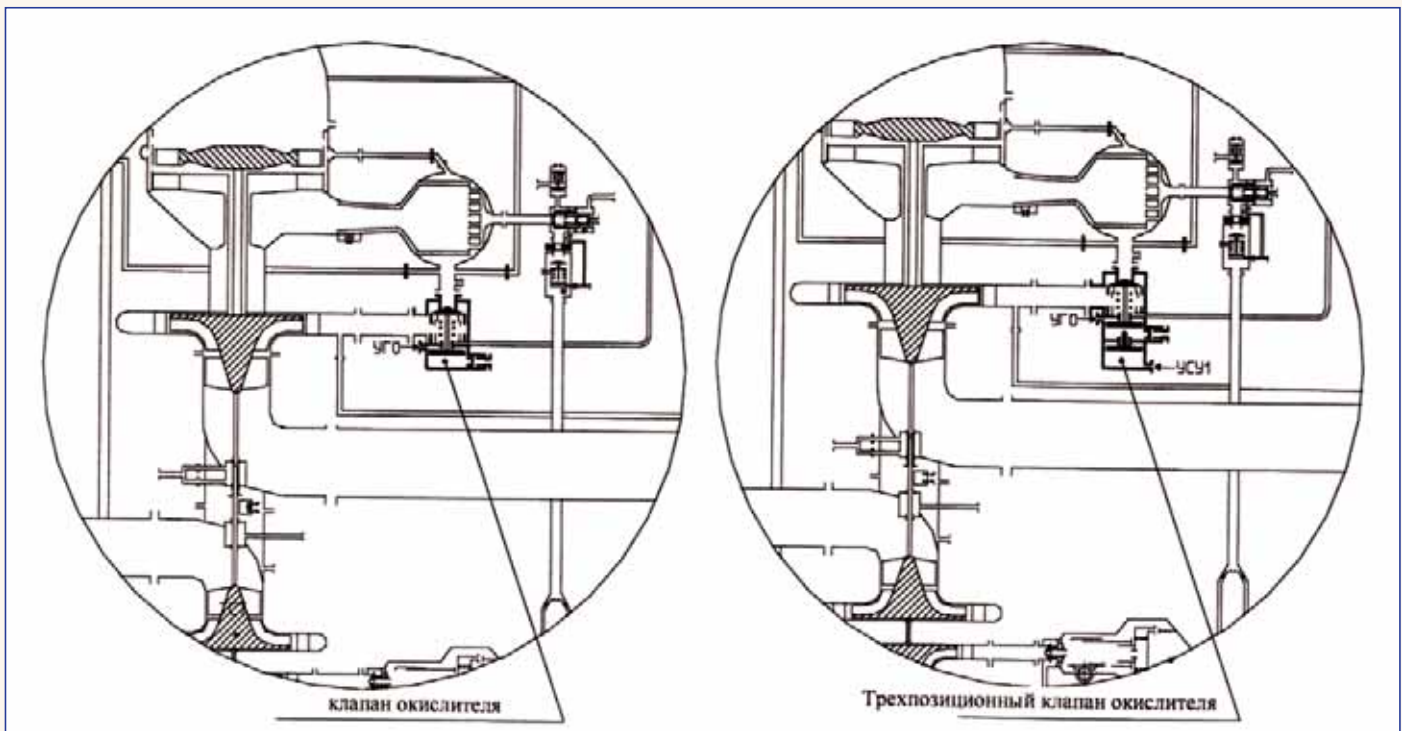


Рис. 3 Фрагмент схемы двигателя РД191 без трехпозиционного клапана окислителя и с ним

менее 38 % по тяге проявились низкочастотные колебания параметров и необходимым оказалось введение в конструкцию трехпозиционного клапана окислителя (рис. 3), который должен прикрываться на низких режимах, увеличивая гидросопротивление по тракту окислителя, повышая тем самым режим работы турбонасосного агрегата и газогенератора, приводящий к снижению амплитуды колебаний [1, 3].

В процессе дальнейшей отработки двигателя было замечено, что на режимах 30 % и ниже на тягу и соотношение компонентов топлива существенное влияние оказывают величины входных давлений компонентов топлива, в этой связи возникла задача учета их влияния в алгоритме управления и регулирования двигателем. Эта задача была успешно решена. Скорректированный алгоритм управления и регулирования двигателем в полете, учитывающий влияние температур и входных давлений компонентов топлива, который обеспечивает требуемую в ТЗ точность воспроизведения режима, представлен ниже:

$$\Delta K_m = K_m - K_{m_{ном}}$$

$$\Delta t_{\Gamma} = t_{\Gamma} - t_{\Gamma_{ном}}$$

$$\Delta t_{O} = t_{O} - t_{O_{ном}}$$

$$\Delta R_i = \beta_1 \Delta t_{\Gamma} + \beta_3 \Delta t_{O};$$

$$\Delta K_{m_i} = \beta_2 \Delta t_{\Gamma} + \beta_4 \Delta t_{O};$$

$$R_i = R - \Delta R_i;$$

При $R > 0,3$:

$$\Delta K_{m_p} = 0.$$

При $R \leq 0,3$:

$$\Delta p_{вхO} = p_{вхO} - p_{вхO_{ном(F1)}};$$

$$\Delta p_{вхГ} = p_{вхГ} - p_{вхГ_{ном}};$$

$$\Delta K_{m_p} = \beta_5 \Delta p_{вхO} + \beta_6 \Delta p_{вхГ}.$$

Обозначения:

K_m - задаваемое СУ РН соотношение компонентов;

$$K_{m_{ном}} = 2,75;$$

$$t_{\Gamma_{ном}} = -5 \text{ } ^\circ\text{C}; t_{O_{ном}} = -182,5 \text{ } ^\circ\text{C};$$

R - уровень тяги, задаваемый СУ РН;

ΔK_{m_p} - поправка, учитывающая влияние входных давлений окислителя и горючего;

β_5, β_6 - значения коэффициентов, определяющие степень влияния входных давлений окислителя и горючего на соотношение компонентов топлива для режима $R = 30 \%$;

$$N_1 = \sum_{i=0}^2 A_i \cdot R_i^i + (\Delta K_m - \Delta K_{m_i}) \cdot \sum_{i=0}^2 C_i \cdot R_i^i;$$

$$N_2 = \sum_{i=0}^2 B_i \cdot R_i^i + (\Delta K_m - \Delta K_{m_i} - \Delta K_{m_p}) \cdot \sum_{i=0}^2 D_i \cdot R_i^i + \Delta N_2 \cdot z,$$

где: $z = 1$ при $R \leq 0,38$, $z = 0$ при $R > 0,38$;

N_1, N_2 - коды, выдаваемые на приводы регулятора и дросселя;

ΔN_2 - поправка кода команды на привод дросселя, учитывающая прикрытие клапана окислителя на режимах 38 % и ниже.

Выводы

1. Разработаны алгоритмы управления и регулирования двигателями, позволяющие в широком диапазоне изменения тяги и соотношения расходов компонентов топлива, с высокой точностью выводить двигатель на заданные режимы работы, варьируя при этом величинами входных давлений с учетом фактических значений температур компонентов топлива и плотности используемого горючего.

2. Созданная и внедренная в ОАО "НПО Энергомаш" технология проведения стендовой отработки двигателя и его автоматической настройки в процессе КТИ не имеет аналогов в отечественной и мировой практике.

3. При проведении КТИ эта технология гарантирует воспроизводимость индивидуальных характеристик двигателя при его работе по полетному алгоритму, что непосредственно влияет на повышение эффективности системы управления РН.

4. Предложен алгоритм управления двигателем непосредственно по кодам, выдаваемым СУ РН на цифровые приводы органов управления двигателем, который может быть использован

для любых двигателей ОАО "НПО Энергомаш". Эффективность настройки и использование полиномиальных уравнений управления по кодам подтверждена в процессе отработки и эксплуатации двигателя РД191.

5. Эффективность разработанного метода настройки ЖРД в процессе КТИ и алгоритмов управления и регулирования при штатной эксплуатации ЖРД подтверждены результатами доводочных и сертификационных испытаний двигателей РД171М, РД180, РД191 и штатной эксплуатацией в составе РН "Зенит" (РД171М), РН семейства "Atlas" (РД180), РН "KSLV-1" (РД191), РН семейства "Ангара" (рис. 4).

Литература

1. Сёмина Е.Н. Обеспечение высокой точности управления и регулирования многорежимных маршевых ЖРД: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук - Химки, "НПО Энергомаш", 2009 - 129 с.

2. Григоренко Д.И., Семин Е.Н. Управление ЖРД с помощью шаговых электрогидроприводов. Сборник трудов НПО Энергомаш №24 - 2006, с. 130-139.

3. Гемранова Е.А., Колбасенков А.И., Кошелев И.М. Способы подавления низкочастотных колебаний в ЖРД на режимах глубокого дросселирования. Сборник трудов НПО Энергомаш №30 - 2013, с. 104-110.

Связь с автором: e-mail: pushcarev@hotmail.com



Рис. 4 Старт РН «Ангара-А5»