

ТЕРМИНАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РАСХОДОВАНИЕМ ТОПЛИВА ПУТЕМ ИЗМЕНЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА СООТНОШЕНИЯ РАСХОДОВ КОМПОНЕНТОВ ЧЕРЕЗ ЖИДКОСТНОЙ ДВИГАТЕЛЬ, МИНИМИЗИРУЮЩЕЕ ОТКЛОНЕНИЯ УДЕЛЬНОЙ ТЯГИ ДВИГАТЕЛЯ

В.П. Иванов

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: vladguc@ipu.ru

А.А. Новиков

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: vladguc@ipu.ru

Ключевые слова: терминальное управление, коэффициент соотношения расходов компонентов, задачи управления, жидкостной двигатель, удельная тяга, кажущаяся скорость.

Аннотация: Рассматривается задача управления расходом топлива путем изменения коэффициента соотношения расходов компонентов через ЖРД. Синтезируется алгоритм управления, минимизирующий отклонение удельной тяги двигателя.

Рассмотрим управление расходом компонентов топлива через жидкостной двигатель. Уравнения процессов расходования компонентов топлива задаются в следующем виде:

$$\begin{cases} m = m_o + m_r, r = r_o + r_r, \\ \frac{dm_o}{dt} = -r_o, \frac{dm_r}{dt} = -r_r, \\ \frac{dr_o}{dt} = f_o(r_o, \alpha_{K_m}, \alpha_R), \frac{dr_r}{dt} = f_r(r_r, \alpha_{K_m}, \alpha_R), \\ \alpha_{K_m}(t) = f_{K_m}(K_m(t), R(t)), \alpha_R(t) = f_R(K_m(t), R(t)), \end{cases}$$

где $t \in [t_0, t_k]$, t_k – терминальный момент.

Начальные условия по массе и расходам компонентов топлива неизвестны. Массы и расходы измеряются в процессе управления.

Краевое условие по остаткам топлива:

$$z_o = m_o(t_k) - m_{o\min} = 0, z_r = m_r(t_k) - m_{r\min} = 0.$$

Ограничение по K_m определяется безопасностью работы двигателя:

$$K_{m\min}(R, t) \leq K_m(t) \leq K_{m\max}(R, t).$$

Управление расходом топлива производится путем изменения параметра K_m двигателя. Для заданного K_m в регуляторе двигателя устанавливаются угловые положения дроссельных заслонок α_{K_m} и α_R . После окончания переходных процессов в регуляторе устанавливаются значения расходов компонентов r_o , r_r в заданном соотношении K_m . Предполагается, что регулятор поддерживает постоянный номинальный режим по тяге двигателя и номинальный суммарный расход топлива. Управление ищется в классе кусочно-постоянных функций времени и прогнозируемых невязок (по окислителю и горючему).

При выборе управления учитывается следующее свойство объекта в части воздействия управления по K_m на расходы компонентов топлива.

Пусть в момент времени t управляющее воздействие на коэффициент соотношения расходов скачкообразно изменилось. Возникающие при этом переходные процессы по расходам компонентов топлива заканчиваются на интервале существенно меньше терминального момента времени.

В общем случае изменение соотношения расходов компонентов топлива через двигатель вызывает отклонение удельной тяги двигателя, что приводит к потерям энергетических характеристик [1].

Эффективность управления будем оценивать величиной кажущейся скорости, набираемой в терминальный момент времени. Изменение кажущейся скорости $W(t)$ определяется уравнением следующего вида:

$$W(t) = \frac{r(t)g(t)P_{уд}}{m(t)+m_k}, P_{уд} = \varphi(K_m).$$

Здесь $P_{уд}$ – удельная тяга двигателя, m_k – масса сухой ступени.

Задача синтеза управления, максимизирующего конечные значения кажущейся скорости, отличается от классической задачи синтеза оптимального управления. Воспользуемся соображениями, вытекающими из физической сущности задачи.

Максимальной удельной тяге двигателя соответствует $K_{mном}$.

Отклонение K_m , потребное для управления, желательно иметь минимальным в конце полета, где отклонения удельной тяги наиболее существенны для энергетики.

Исходя из этого управление по K_m зададим в классе кусочно-постоянных функций времени следующего вида:

$$\begin{aligned} K_m(\tau') &= K_m(t), t \leq \tau_1 \leq \tau, \\ K_m(\tau') &= K_{mном}, \tau \leq \tau_1 \leq t_k. \end{aligned}$$

Будем полагать, что величина τ уменьшается при увеличении t :

$$\tau = t + \beta(t_k - t),$$

где β – заданный коэффициент.

В объекте реализуется текущее управление $K_m(t)$ как функция прогнозируемых невязок.

Прогнозирование невязок краевых условий производится по уравнениям объекта по результатам текущих измерений масс и расходов компонентов при постоянном суммарном расходе. Предполагается, что значения расходов компонентов r_o , r_r на интервале времени $t \div t_{постоянны}$ и соответствуют заданному управлению $K_m(t)$. На оставшемся интервале $t_{кпр} \div t_{расходы}$ расходы компонентов равны номинальным значениям. Значения прогнозируемых невязок определяются следующими выражениями [2]

$$\begin{aligned} z_{опр}(t) &= m_o(t) - r_o(t)(\tau - t) - r_{оном}(t_{кпр} - \tau) - m_{оmin}, \\ z_{гпр}(t) &= m_r(t) - r_r(t)(\tau - t) - r_{гном}(t_{кпр} - \tau) - m_{гmin}, \\ z(t) &= m(t) - r(t_{кпр} - t) - m_{оmin} - m_{гmin}. \end{aligned}$$

Величина $t_{кпр}$ определяется из условия $z(t_{кпр}) = 0$.

Момент $t_{кпр}$ используется для выключения двигателя.

Определим производную от $z_{опр}$, $z_{гпр}$ по времени t .

$$\frac{dz_{\text{онп}}}{dt} = \frac{dr_o}{dt}(-\tau + t) + (-r_o + r_{\text{оном}})(1 - \beta),$$

$$\frac{dz_{\text{гп}}}{dt} = \frac{dr_r}{dt}(-\tau + t) + (-r_r + r_{\text{гном}})(1 - \beta).$$

Произведем дискретизацию задачи управления. Пусть $t_i, i = 1, 2, \dots, N$ – моменты времени прогнозирования невязок конечных условий. По результатам прогнозирования изменяются параметры гибкой стратегии управления.

Определим разностные уравнения, характеризующие изменение прогнозируемых невязок в дискретные моменты времени при скачкообразном изменении управления по K_m в момент времени t_i и изменении момента переключения τ . С этой целью проинтегрируем непрерывные уравнения для прогнозируемых невязок на интервале времени $t_i \div t_i + \varepsilon$ при постоянном значении τ , $\tau = \tau_i = t_i + \beta(t_{\text{кпп}} - t_i)$. Примем во внимание, что на указанном интервале заканчиваются переходные процессы в регуляторе двигателя при изменении величины параметра K_m .

Пусть далее в момент времени $t_i + \varepsilon$ величина τ скачкообразно принимает значения $\tau_{i+1} = t_{i+1} + \beta(t_{\text{кпп}} - t_{i+1})$. В результате получим:

$$z_{\text{онп}}(t_i + \varepsilon) = z_{\text{онп}}(t_i) + (t_i - \tau_i)(r_o(t_i + \varepsilon) - r_o(t_i)) + (r_{\text{оном}} - r_o(t_i + \varepsilon))(\tau_{i+1} - \tau_i),$$

$$z_{\text{гп}}(t_i + \varepsilon) = z_{\text{гп}}(t_i) + (t_i - \tau_i)(r_r(t_i + \varepsilon) - r_r(t_i)) + (r_{\text{гном}} - r_r(t_i + \varepsilon))(\tau_{i+1} - \tau_i).$$

На интервале $t_i + \varepsilon \div t_{i+1}$ невязки не изменяются:

$$z_{\text{онп}}(t_{i+1}) = z_{\text{онп}}(t_i + \varepsilon), z_{\text{гп}}(t_{i+1}) = z_{\text{гп}}(t_i + \varepsilon).$$

Выразим $r_r(t_i + \varepsilon)$, $r_o(t_i + \varepsilon)$ из условия равенства нулю прогнозируемых невязок:

$$r_r(t_i + \varepsilon) = r_r(t_i) + \frac{-z_{\text{гп}}(t_i) - (\tau_{i+1} - \tau_i)r_{\text{гном}}}{t_i - \tau_{i+1}},$$

$$r_o(t_i + \varepsilon) = r_o(t_i) + \frac{-z_{\text{онп}}(t_i) - (\tau_{i+1} - \tau_i)r_{\text{оном}}}{t_i - \tau_{i+1}}.$$

Определим управляющее воздействие по K_m , которое реализуется регулятором двигателя в момент $t_i + \varepsilon$:

$$K_m(t_i + \varepsilon) = \frac{r_o(t_i + \varepsilon)}{r_r(t_i + \varepsilon)}.$$

Так как при номинальном суммарном расходе, поддерживаемом регулятором двигателя, сумма прогнозируемых невязок в момент времени $t_i + \varepsilon$ равна нулю, то при выбранном управлении $K_m(t)$ будут равны нулю $z_{\text{онп}}(t_i + \varepsilon)$ и $z_{\text{гп}}(t_i + \varepsilon)$.

Отметим, что из выбранной программы управления по K_m , учитываемой при прогнозировании невязок, в объекте реализуется только текущее управляющее воздействие. При этом перестройка K_m на $K_{m\text{ном}}$ в явном виде не реализуется. Тем не менее, в процессе управления при $t \rightarrow t_{\text{кпп}}$, $K_m \rightarrow K_{m\text{ном}}$. В итоге в терминальный момент времени может возникнуть конечная ошибка управления в виде ненулевых остатков компонентов топлива. Величина этой ошибки пренебрежительно мала, по сравнению с погрешностями управления, связанными со случайными ошибками измерения и возмущениями, действующими на объект в реальных условиях.

Для выбранного управления расходом компонентов топлива путем изменения параметра K_m двигателя определяется величина кажущейся скорости в терминальный момент времени с учетом уменьшения удельной тяги двигателя в процессе управления. Конечная величина кажущейся скорости зависит от параметров гибкой стратегии управления величиной K_m двигателя. Оценка эффективности управления производится по результатам моделирования задачи управления расходом топлива на конкретном примере.

Список литературы

1. Петров Б.Н., Портнов-Соколов Ю.П., Андриенко А.Я., Иванов В.П.. Бортовые терминальные системы управления. М.: Машиностроение, 1983. 200 с.
2. Иванов В.П., Стаменкович Н., Каблова Е.Б., Кленовая Л.Г. Детерминированный синтез алгоритмов управления расходом топлива из баков жидкостной ракеты-носителя с учетом условий устойчивой работы двигателя // Труды ФГУП «НПЦАП». Системы и приборы управления. 2020. № 3. С. 31-41.