

МОДЕЛИ, АЛГОРИТМЫ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ РАСХОДОВАНИЕМ ТОПЛИВА МОНОБЛОЧНЫХ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ

А.А. Муранов

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65

E-mail: vladguc@ipu.ru

Ключевые слова: моноблочная ракета-носитель, система управления расходом топлива, модель объекта, алгоритм управления, метод анализа.

Аннотация: Представлены основные этапы разработки систем управления расходом топлива моноблочных жидкостных ракет-носителей. Эти этапы включают декомпозицию исходной линеаризованной системы на две подсистемы, формирование моделей объектов подсистем, разработку алгоритмов управления и метода анализа работы подсистем и исходной системы при летных испытаниях.

1. Введение

В работе рассматривается класс бортовых терминальных систем – системы управления расходом топлива (СУРТ) моноблочных жидкостных ракет-носителей (РН) легкого класса или моноблочных ступеней РН среднего и тяжелого классов. Для определенности далее будут рассматриваться ракетные блоки моноблочных РН в составе одного жидкостного ракетного двигателя, баков окислителя и горючего с трубопроводами, системы наддува баков, систем управления и др.

СУРТ ракетного блока (ступени) объединяет в себе, как правило, две подсистемы: систему регулирования опорожнения баков (СОБ) и систему прогнозирования момента времени (СПВ) окончания топлива (или отдельных его компонентов) в баках.

В работе излагаются основные этапы разработки систем СУРТ моноблочных РН. Применение единого подхода к формированию моделей объектов, разработке алгоритмов управления и метода анализа работы СУРТ при летно-конструкторских испытаниях (ЛКИ) позволяет повысить точность и надежность работы систем.

2. Модели объектов системы управления расходом топлива моноблочных жидкостных ракет-носителей

В данном разделе сформированы модели объектов подсистем СОБ и СПВ, которые используются на последующих этапах разработки СУРТ.

2.1. Модель объекта системы регулирования опорожнения баков

Принципы работы и физические основы построения СОБ ракетного блока обстоятельно изложены в работе [1]. В этих системах запасы окислителя и горючего в баках ракеты определяются при помощи дискретных датчиков уровня, которые представляют собой штанги с набором равного числа I чувствительных элементов (ЧЭ).

Управляемый процесс расходования компонентов топлива из баков ракетного блока описывается линеаризованными уравнениями:

$$\begin{aligned}
 \Delta t_i &= \Delta t_0 - \sum_{r=0}^{i-1} (\delta K_V(0) + \delta K_{V \text{ пр.}r}) \Delta T_r - \\
 &- \sum_{r=0}^{i-1} \sum_{s=0}^r (\Delta \delta K_s + \xi_s) \Delta T_r, \quad i = 1, 2, \dots, I+1, \\
 (1) \quad \Delta t_{\text{изм.}i} &= t_{\text{изм.о.}i} - t_{\text{изм.г.}i} = \Delta t_i + \Delta t_{f_i}, \quad i = 1, 2, \dots, I, \\
 \delta K_{m_i} &= \delta K_V(0) + \delta K_{m \text{ пр.}i} + \sum_{s=0}^{i-1} (\Delta \delta K_s + \xi_s), \quad i = 0, 1, \dots, I,
 \end{aligned}$$

где Δt_i ($\Delta t_{\text{изм.}i}$) – истинное (вычисленное с ошибками уровнемерных измерений) временное рассогласование объемов компонентов топлива на i -й паре ЧЭ уровнемеров; Δt_0 (Δt_{I+1}) – начальное (конечное) временное рассогласование объемов компонентов топлива; $t_{\text{изм.о.}i}$ ($t_{\text{изм.г.}i}$) – момент времени срабатывания i -го ЧЭ уровнемера окислителя (горючего); ΔT_i – номинальный интервал временной расстановки ЧЭ уровнемеров окислителя и горючего; $\delta K_V(0)$ – начальное относительное отклонение от номинала коэффициента соотношения расходов компонентов топлива, вызванное ошибкой настройки маршевого двигателя; $\delta K_{V \text{ пр.}i}$ ($\delta K_{m \text{ пр.}i}$) – относительное отклонение (на интервале времени ΔT_i) от номинала коэффициента соотношения объемных (массовых) расходов компонентов топлива, вызванное влиянием внешних факторов на входе в двигатель; $\Delta \delta K_i$ – управляющий сигнал на изменение коэффициента соотношения объемных расходов компонентов топлива, вычисленный после срабатывания i -й пары ЧЭ уровнемеров; Δt_{f_i} – погрешность формирования временного рассогласования $\Delta t_{\text{изм.}i}$ объемов компонентов топлива; ξ_i – погрешность отработки управляющего сигнала $\Delta \delta K_i$; δK_{m_i} – относительное отклонение (на интервале времени ΔT_i) от номинала коэффициента соотношения массовых расходов компонентов топлива через двигатель.

Точность работы СОБ определяется временным рассогласованием Δt_{I+1} объемов компонентов топлива в терминальный момент времени t_{I+1} и переменной δK_{m_i} , $i = 0, 1, \dots, I$, характеризующей работу маршевого двигателя.

2.2. Модель объекта системы прогнозирования момента времени окончания топлива

Информационная система СПВ исследуется на режиме главной ступени тяги маршевого двигателя, тяга которого регулируется с допустимой погрешностью системой поддержания давления (СПД) в камерах сгорания двигателя.

Реальный процесс прогнозирования в СПВ (при действии случайных возмущающих факторов) рассматривается относительно номинального процесса. Для этого вводится «измеренный» сигнал рассогласования $\Delta t_{\text{изм.}i}$ между фактическим и номинальным моментами времени прохождения топлива на i -й паре ЧЭ уровнемеров:

$$\Delta\tau_{\text{изм.}i} = (K_m t_{\text{изм.о.}i} + t_{\text{изм.г.}i}) / (K_m + 1) - t_0 - t_i, \quad i = 1, 2, \dots, I,$$

где K_m – номинальный коэффициент соотношения массовых расходов компонентов топлива через двигатель; $t_i = \sum_{r=0}^{i-1} \Delta T_r$ – номинальный момент времени срабатывания i -й пары ЧЭ уровнемеров, отсчитываемый от момента времени t_0 начала работы СОБ. Поэтому объект прогнозирования описывается уравнениями:

$$(2) \quad \begin{aligned} \Delta\tau_i &= \Delta\tau_0 - \lambda_{\Sigma} t_i, \quad i = 1, 2, \dots, I, \\ \Delta\tau_{\text{изм.}i} &= \Delta\tau_i + \Delta\tau_{f_i}, \quad i = 1, 2, \dots, I, \\ T_{\text{пр}} &= t_0 + \Delta\tau_0 + (1 - \lambda_{\Sigma}) \sum_{i=0}^I \Delta T_i, \\ \Delta T_{\text{ост}} &= T_{\text{пр}} - T_{\text{пр.}i}, \quad i = I, \end{aligned}$$

где $\Delta\tau_i$ – сигнал рассогласования на i -й паре ЧЭ уровнемеров; $\Delta\tau_0$ – начальное значение сигнала рассогласования; λ_{Σ} – относительное отклонение от номинала суммарного расхода компонентов топлива через маршевый двигатель, вызванное погрешностью работы СПД и др.; $\Delta\tau_{f_i}$ – погрешность формирования «измеренного» сигнала рассогласования $\Delta\tau_{\text{изм.}i}$ на i -й паре ЧЭ уровнемеров; $T_{\text{пр}}$ – прогнозируемый момент времени окончания топлива в баках, вычисленный после пуска РН по данной модели объекта; $T_{\text{пр.}i}$, $i = I$, – прогнозируемый момент времени окончания топлива в баках, вычисленный в бортовом алгоритме СПВ на последней, I -й паре ЧЭ уровнемеров; $\Delta T_{\text{ост}}$ – временной остаток топлива в баках в прогнозируемый момент времени $T_{\text{пр.}i}$, $i = I$, (характеризует точность прогнозирования по алгоритму СПВ).

3. Принципиальные алгоритмы системы управления расходом топлива

Принципиальные алгоритмы позволяют кратко охарактеризовать основные закономерности работы бортовых алгоритмов подсистем СОБ и СПВ.

Входной информацией для алгоритмов СУРТ являются измеренные моменты $t_{\text{изм.о.}i}$ и $t_{\text{изм.г.}i}$ срабатывания i -й, $i = 1, 2, \dots, I$, пары ЧЭ уровнемеров окислителя и горючего.

3.1. Алгоритм системы регулирования опорожнения баков

В качестве управляющего сигнала СОБ на i -й, $i = 1, 2, \dots, I$, паре ЧЭ может быть принята некоторая переменная алгоритма из следующего перечня [2]:

- $\Delta\delta K_i$ – сигнал представлен в уравнениях (1) объекта СОБ;
- δK_i – сигнал на реализацию относительного отклонения от номинала K_V коэффициента соотношения объемных расходов компонентов топлива через двигатель;
- K_i – сигнал на реализацию коэффициента соотношения объемных расходов компонентов топлива через двигатель.

Вычисление управляющего сигнала СОБ осуществляется в общем случае по рекуррентному алгоритму:

$$\begin{aligned}\Delta t_{\text{изм.}i}^* &= (t_{\text{изм.о.}i} + \varepsilon_{\text{о.}i}) - (t_{\text{изм.г.}i} + \varepsilon_{\text{г.}i}), \quad i = 1, 2, \dots, I, \\ \Delta \delta K_i &= \begin{cases} A_i \Delta t_{\text{изм.}i}^*, & i = 1, \\ A_i (B_i \Delta t_{\text{изм.}i}^* - \Delta t_{\text{изм.}(i-1)}^*), & i > 1, \end{cases} \\ \delta K_i &= \delta K_{i-1} + \Delta \delta K_i, \quad \delta K_0 = 0, \quad i = 1, 2, \dots, I, \\ K_i &= K_V (1 + \delta K_i), \quad i = 1, 2, \dots, I,\end{aligned}$$

где $\Delta t_{\text{изм.}i}^*$ – скорректированное временное рассогласование объемов компонентов топлива в баках на i -й паре сработавших ЧЭ уровнемеров; $\varepsilon_{\text{о.}i}$ ($\varepsilon_{\text{г.}i}$) – корректирующие поправки, учитывающие выявленные погрешности геометрической расстановки ЧЭ уровнемера окислителя (горючего); A_i , B_i – параметры алгоритма СОБ.

В зависимости от начальных условий объекта управления и заданных требований к регулируемым координатам может быть дополнительно сформирован и обработан программный управляющий сигнал в момент времени t_0 (см. об этом в уравнениях (1)).

В системах СОБ семейства РН «Союз-2» используются все три вида управляющих переменных в зависимости от точности обработки, возмущающих факторов и др. [2].

3.2. Алгоритм системы прогнозирования момента времени окончания топлива

Выходной сигнал СПВ формируется по следующему рекуррентному алгоритму:

$$\begin{aligned}t_{\text{пр.}i} &= \begin{cases} t_1, & i = 1, \\ t_{\text{пр.}(i-1)} + (T_{i-1} - T_i)(1 + \lambda_{i-1}), & i = 2, 3, \dots, I, \end{cases} \\ \Delta \tau_i^* &= [K_m (t_{\text{изм.о.}i} + \varepsilon_{\text{о.}i}) + t_{\text{изм.г.}i} + \varepsilon_{\text{г.}i}] / (K_m + 1) - t_{\text{пр.}i}, \quad i = 1, 2, \dots, I, \\ \Delta \lambda_i &= \begin{cases} 0, & i = 1, \\ C_i (D_i \Delta \tau_i^* - \Delta \tau_{i-1}^*), & i = 2, 3, \dots, I, \end{cases} \\ \lambda_i &= \lambda_{i-1} + \Delta \lambda_i, \quad \lambda_0 = 0, \quad i = 1, 2, \dots, I, \\ T_{\text{пр.}i} &= t_{\text{пр.}i} + T_i (1 + \lambda_i), \quad i = 1, 2, \dots, I,\end{aligned}$$

где t_1 – номинальный момент времени срабатывания первой пары ЧЭ уровнемеров окислителя и горючего; $t_{\text{пр.}i}$ – прогнозируемое значение переменной СПВ; T_i – номинальный интервал времени от момента срабатывания i -й пары ЧЭ уровнемеров до момента окончания топлива в баках ступени; $\Delta \tau_i^*$ – сигнал рассогласования в СПВ; λ_i – корректирующий сигнал СПВ; $\Delta \lambda_i$ – приращение корректирующего сигнала СПВ; C_i , D_i – параметры алгоритма СПВ; $T_{\text{пр.}i}$ – прогнозируемый момент времени окончания топлива в баках, вычисленный после срабатывания i -й пары ЧЭ уровнемеров.

4. Методы анализа работы систем управления расходом топлива при летно-конструкторских испытаниях

При обработке и проверке бортовых систем РН семейства «Союз-2» на этапе ЛКИ были апробированы в разной степени три метода анализа работы СУРТ [3]:

- метод оценивания вектора возмущений высокой размерности,
- минимаксный метод оценивания,

с) метод наименьших квадратов (МНК).

Особенности, достоинства и недостатки указанных методов анализа работы подсистем СУРТ отражены в [3]. На основании обработки более 20 пусков РН «Союз-2» предпочтение по точности и достоверности оценивания было отдано методу МНК.

Задача анализа работы СОБ ракетного блока РН на этапе ЛКИ состоит в том, чтобы, используя уравнения (1), априорные параметры объекта $(t_i, \Delta T_i)$ и телеметрическую информацию $(t_{\text{изм.о.}i}, t_{\text{изм.г.}i}, \Delta \delta K_i, \delta K_{V \text{ пр.}i}, \delta K_{m \text{ пр.}i}, \xi_i)$, определить оценки случайных начальных возмущений Δt_0 , $\delta K_V(0)$, регулируемой координаты Δt_i , погрешностей Δt_{fi} и точностных характеристик системы: Δt_{I+1} , δK_{mi} .

Решение задачи анализа работы СОБ при ЛКИ определяется при выполнении следующей двухэтапной процедуры [4].

- 1) Оценивание по МНК неконтролируемых начальных возмущений Δt_0 , $\delta K_V(0)$.
- 2) Оценивание по модели объекта (1) динамических и точностных характеристик СОБ.

Задача анализа работы СПВ ракетного блока РН при ЛКИ состоит в том, чтобы, используя уравнения (2), априорные параметры объекта $(t_i, \Delta T_i)$ и телеметрическую информацию $(t_{\text{изм.о.}i}, t_{\text{изм.г.}i}, T_{\text{пр.}i})$, определить оценки начальных возмущений Δt_0 , λ_Σ , сигнала рассогласования Δt_i , погрешностей Δt_{fi} , прогнозируемого момента времени $T_{\text{пр}}$ окончания топлива и точности прогнозирования $\Delta T_{\text{ост}}$.

Решение задачи анализа работы СПВ при ЛКИ определяется при выполнении двухэтапной процедуры (аналогично, как и для СОБ) [4].

Комплексирование результатов анализа работы подсистем СОБ и СПВ позволяет сформировать дополнительную информацию о динамическом процессе в СУРТ [4].

5. Заключение

Исследованы основные этапы разработки систем управления расходом топлива (СУРТ) моноблочных РН. Для выполнения этих этапов необходимо осуществить декомпозицию СУРТ на подсистемы СОБ и СПВ, формирование моделей объектов подсистем, разработку алгоритмов управления и метода анализа работы подсистем и СУРТ при летных испытаниях. Использование результатов исследований при разработке СУРТ третьей ступени РН «Союз-2» существенно повысило точность систем.

Список литературы

1. Петров Б.Н., Портнов-Соколов Ю.П., Андриенко А.Я., Иванов В.П. Бортовые терминальные системы управления (принципы построения и элементы теории). М.: Машиностроение, 1983. 200 с.
2. Муранов А.А. К вопросу о точности отработки управляющих воздействий в системах управления расходом топлива жидкостных ракет // Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2014. Москва, 16-19 июня 2014 г. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. С. 3450-3457.
3. Муранов А.А. Методы оценивания динамических процессов в системах управления расходом топлива жидкостных ракет на этапе ЛКИ // Материалы конференции «Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах» (УТЭОСС-2012). СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электро-прибор», 2012. Т. 1. С. 301-304.

4. Муранов А.А. Оценивание динамических процессов в системах управления расходом топлива моноблочных жидкостных ракет-носителей при летно-конструкторских испытаниях // Проблемы управления. 2017. № 3. С. 64-69.