

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИСКЛЮЧЕНИЯ СИСТЕМЫ РСК НА ДИНАМИКУ И ТОЧНОСТЬ РАБОТЫ СУРТ БОКОВЫХ БЛОКОВ РН «СОЮЗ-2»

© 2020 В.П. Иванов, В.К. Завадский, А.А. Муранов, Е.И. Тропова, А.И. Чадаев

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва

Статья поступила в редакцию 24.08.2020

В статье приводятся результаты исследования влияния учета нелинейности характеристики дросселей боковых блоков (ББ) ракеты-носителя (РН) «Союз-2» на динамические и точностные характеристики работы системы управления расходом топлива (СУРТ). При исключении системы регулирования соотношения компонентов (РСК) из состава СУРТ ББ на точность реализации вычисленных в алгоритме СУРТ управляющих команд начинают влиять технологические разбросы угловой скорости вращения различных образцов приводов дросселей ББ, нелинейность и технологический разброс характеристик дросселей, определяющих зависимость значений перепада давлений на дросселе от угла поворота дросселя и др. Для оценки последствий исключения системы РСК из системы СУРТ ББ была выбрана аналитическая зависимость для аппроксимации характеристики дросселя и вычислены ее параметры, скорректирована имитационная модель объекта управления СУРТ для учета дополнительных возмущающих факторов, сформированы и исследованы (с помощью моделирования на ПЭВМ) имитационные модели алгоритма управления двигателем ББ и даны рекомендации по использованию варианта алгоритма, обеспечивающего наиболее совершенные динамические и точностные характеристики работы СУРТ ББ.

Ключевые слова: Система управления расходом топлива, метод наименьших квадратов, нелинейная характеристика дросселя, динамические и точностные характеристики работы СУРТ.

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-4-98-00

ВВЕДЕНИЕ

Система управления расходом топлива (СУРТ) боковых блоков (ББ) РН «Союз-2» включает в себя две основные системы, а именно, систему регулирования соотношения компонентов (РСК) и систему внутриблочной синхронизации опорожнения баков (СОБ) [1]. Система РСК регулирует соотношение расходов компонентов топлива по показаниям расходомеров, установленных в топливных магистралях двигателя ББ, с коррекцией этого соотношения расходов компонентов топлива по показаниям уровнемеров.

Исключение системы РСК из состава СУРТ ББ РН «Союз-2» может привести к ухудшению точности реализации вычисленных в алгоритме СУРТ

управляющих команд на изменение коэффициента K_m соотношения массовых расходов компонентов топлива и связанному с этим ухудшению динамических и точностных характеристик работы СУРТ. Основными факторами, влекущими эти изменения, являются следующие:

- технологический разброс (до 40 %) угловой скорости вращения различных образцов привода дросселя бокового блока, искажающий требуемые угловые перемещения дросселя при контроле за длительностью отработки вычисленных команд управления;

- нелинейность и технологический разброс характеристик образцов дросселя СУРТ ББ, определяющих функциональную зависимость значений перепада давлений на дросселе (а, следовательно, и значений коэффициента соотношения расходов) от угла поворота привода дросселя (см. рис. 1);

- технологический разброс коэффициента влияния перепада давления дросселя на отклонение от номинала коэффициента соотношения расходов компонентов (или нелинейность указанной зависимости) для различных образцов двигателей ББ.

В условиях отсутствия регулирования системой РСК текущего значения коэффициента соотношения расходов компонентов топлива, эти факторы приводят к дополнительным ошибкам реализации требуемых для синхронизации моментов выработки запасов компонентов топлива значений коэффициента K_m , возрастающим

Иванов Владимир Петрович, доктор технических наук, заведующий лабораторией терминальных систем управления. E-mail: vladguc@ipu.rssi.ru

Завадский Владимир Константинович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории терминальных систем управления. E-mail: vladguc@ipu.rssi.ru

Муранов Анатолий Алексеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории терминальных систем управления. E-mail: vladguc@ipu.rssi.ru

Тропова Елена Ивановна, научный сотрудник лаборатории терминальных систем управления. E-mail: vladguc@ipu.rssi.ru

Чадаев Александр Иванович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории терминальных систем управления. E-mail: vladguc@ipu.rssi.ru

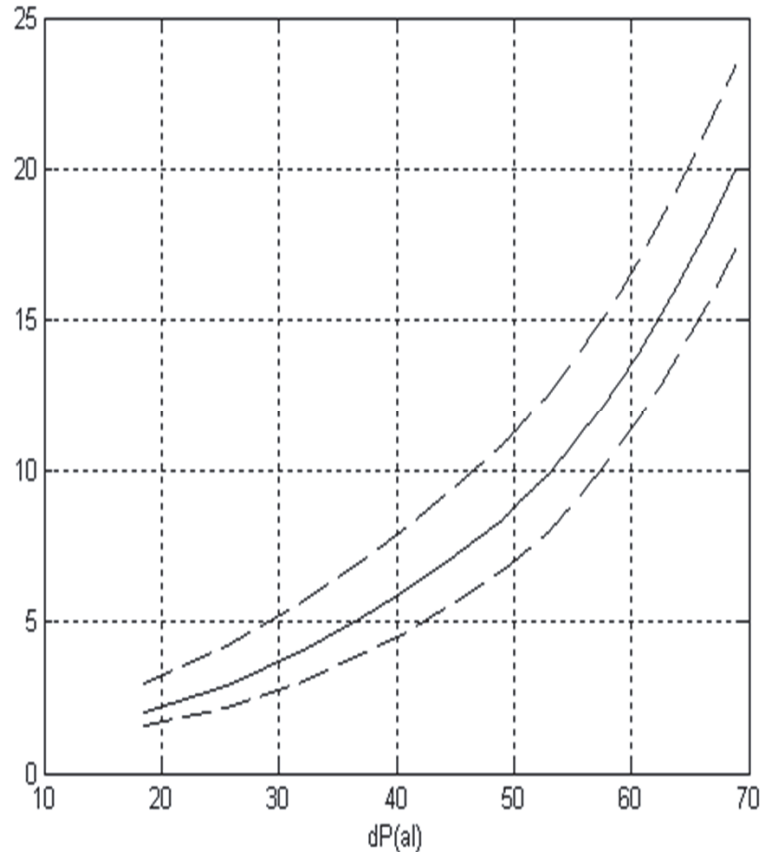


Рис. 1. Характеристика дросселя ББ. Зависимость перепада давления DP (кгс/см²) на дросселе при номинальном расходе горючего от угла α (град) установки дросселя по шкале. Пунктиром указаны пределы разброса характеристик отдельных дросселей

с увеличением вычисленного для достижения желаемого значения K_m углового перемещения дросселя.

Кроме того, на систему СОБ начинают действовать ошибка настройки двигателя на номинальный коэффициент $K_{m \text{ ном}}$ соотношения массовых расходов компонентов топлива и дополнительные возмущения (так называемые внешние факторы), связанные с начальным разбросом и изменением в полете температур и давлений компонентов топлива на входе в двигатель и вызывающие изменение коэффициента соотношения расходов компонентов топлива.

Для модельной оценки последствий исключения системы РСК из системы СУРТ ББ необходимо:

- выбрать вид и вычислить параметры аналитической зависимости для аппроксимации характеристики дросселя, заданной в графической форме (см. рис. 1);

- скорректировать имитационную модель объекта управления СУРТ для учета перечисленных дополнительных возмущающих факторов;

- сформировать имитационные модели алгоритма управления двигателем ББ и провести моделирование работы системы для разных вариантов учета (или не учета) в алгоритме нелинейности в исполнительном тракте системы СУРТ.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Аппроксимация нелинейной характеристики дросселя двигателя ББ

Для аппроксимации представленной на рис. 1 характеристики дросселя по методу наименьших квадратов [2] было рассмотрено несколько вариантов аналитических зависимостей полиномиального типа. В качестве предпочтительного выбран вариант аппроксимации указанной зависимости $DP(\alpha)$ двумя квадратичными полиномиальными сплайнами вида:

$$\Delta \bar{P} = c_1 \Delta \bar{\alpha} + c_2 \Delta \bar{\alpha}^2, \quad \text{если } \Delta \bar{\alpha} \geq 0,$$

$$\Delta \bar{P} = c_3 \Delta \bar{\alpha} + c_4 \Delta \bar{\alpha}^2, \quad \text{если } \Delta \bar{\alpha} < 0.$$

Здесь введены обозначения:

$$\Delta \bar{P} = \Delta P - \Delta P_{\text{ном}}, \quad \Delta \bar{\alpha} = \alpha - \alpha_{\text{ном}},$$

где $\Delta \bar{P}$, $\Delta \bar{\alpha}$ – отклонения от номинальных значений $\Delta P_{\text{ном}}$, $\alpha_{\text{ном}}$ перепада давления и угла поворота дросселя; c_1, \dots, c_4 – параметры аппроксимации.

Приведенные выше соотношения удобно представить в виде номинальной зависимости $\delta \bar{K}_m(\Delta \bar{\alpha})$ относительного отклонения от номи-

нала коэффициента K_m соотношения массовых расходов компонентов топлива от $\Delta\bar{\alpha}$:

$$\delta\bar{K}_m = b_1\Delta\bar{\alpha} + b_2\Delta\bar{\alpha}^2, \quad \text{если } \Delta\bar{\alpha} \geq 0,$$

$$\delta\bar{K}_m = b_3\Delta\bar{\alpha} + b_4\Delta\bar{\alpha}^2, \quad \text{если } \Delta\bar{\alpha} < 0.$$

Здесь

$$\delta\bar{K}_m = \frac{K_m - K_{m\text{ном}}}{K_{m\text{ном}}} = \left(\frac{\partial\delta K_m}{\partial\Delta P} \right)_{\text{ном}} \cdot \Delta\bar{P};$$

$$b_i = \left(\frac{\partial\delta K_m}{\partial\Delta P} \right)_{\text{ном}} \cdot c_i, \quad i = 1, 2, \dots, 4,$$

где i - номер бокового блока.

В качестве номинального значения угла $\alpha_{\text{ном}}$ установки дросселя ББ целесообразно принять среднее по результатам обработки летных испытаний формулярное значение, равное $\alpha_{\text{ном}} \approx 49^\circ$. В соответствии с номинальной характеристикой дросселя (см. рис. 1), ему соответствует номинальный перепад давлений $\Delta P_{\text{ном}} \approx 8,4$ кгс/см². С учётом номинального значения соотношения $(\partial\delta K_m / \partial\Delta P)_{\text{ном}} = 0,013$ для ББ РН «Союз-2» по методу наименьших квадратов выбраны следующие численные значения для параметров b_i аналитической аппроксимации характеристики дросселя $\delta\bar{K}_m(\Delta\bar{\alpha})$:

$$b_1 = 0,0043376, \quad b_2 = 0,00016126,$$

$$b_3 = 0,0040982, \quad b_4 = 0,000045385.$$

График этой зависимости представлен на рис. 2.

Данная зависимость предназначена для использования в составе имитационной модели объекта управления СУРТ. Она позволяет по реализованному в модели объекту угловому положению дросселя определять коэффициент соотношения расходов компонентов топлива.

Для использования в алгоритме управления требуется сформировать в аналитической форме зависимость $\Delta\bar{\alpha}(\delta\bar{K}_m)$, обратную к $\delta\bar{K}_m(\Delta\bar{\alpha})$. Знание такой зависимости позволит вычислить по требуемому значению коэффициента соотношения расходов компонентов топлива желаемое угловое положение дросселя.

В качестве предпочтительного варианта аналитического представления для функции, аппроксимирующей обратную зависимость $\Delta\bar{\alpha}(\delta\bar{K}_m)$, также выбран вариант аппроксимации её двумя квадратичными полиномиальными сплайнами вида:

$$\Delta\bar{\alpha} = a_1\delta\bar{K}_m - a_2\delta\bar{K}_m^2, \quad \text{если } \delta\bar{K}_m \geq 0,$$

$$\Delta\bar{\alpha} = a_3\delta\bar{K}_m - a_4\delta\bar{K}_m^2, \quad \text{если } \delta\bar{K}_m < 0.$$

Для параметров a_i ($i = 1, 2, \dots, 4$) аппроксимации обратной характеристики с использованием метода наименьших квадратов получены следующие численные значения:

$$a_1 = 191,017, \quad a_2 = 402,414,$$

$$a_3 = 192,443, \quad a_4 = 2046,79.$$

График обратной зависимости представлен на рис. 3.

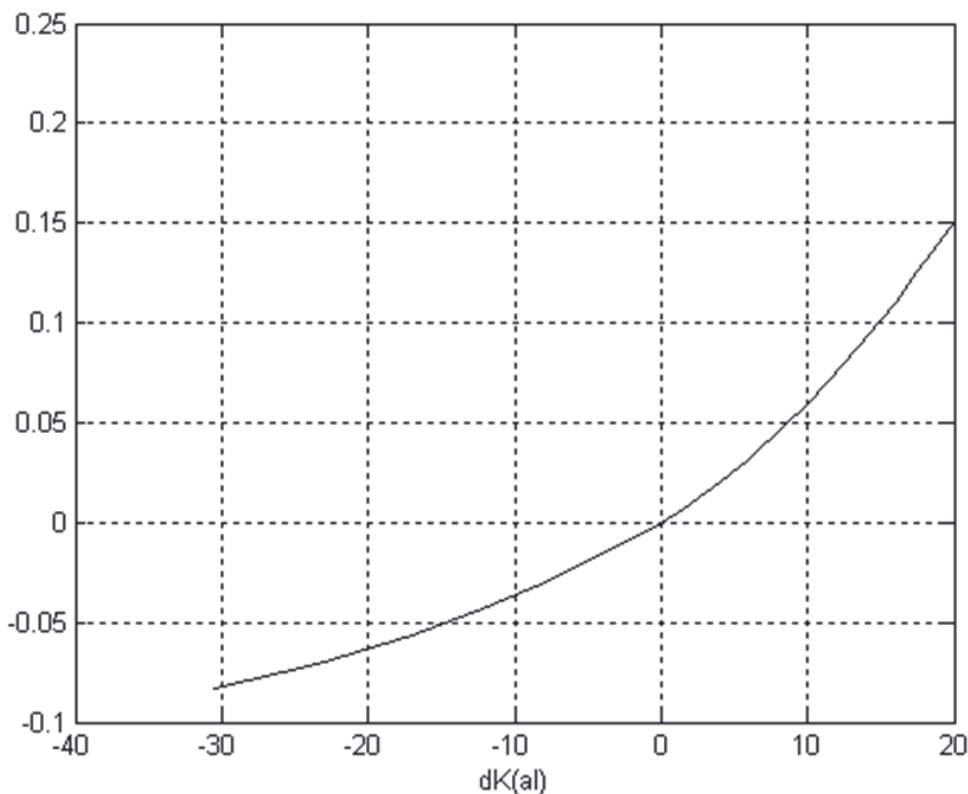


Рис. 2. График характеристики $\delta\bar{K}_m(\Delta\bar{\alpha})$

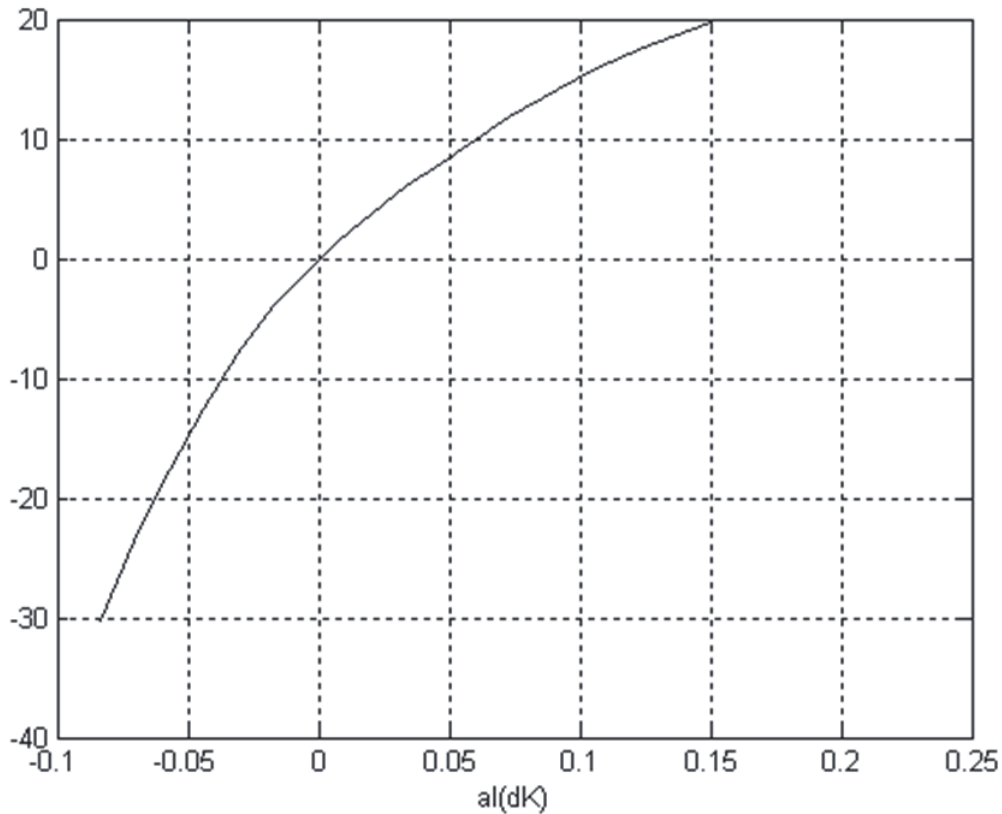


Рис. 3. График характеристики $\Delta\bar{\alpha}(\delta\bar{K}_m)$

2. Имитационная модель безрасходомерного исполнительного тракта СУРТ ББ с нелинейной характеристикой дросселя

Задача адекватного учета при моделировании нелинейной характеристики дросселя осложняется тем обстоятельством, что каждый образец двигателя ББ, состыкованный с приводом и дросселем, проходит индивидуальную настройку на номинальное значение коэффициента соотношения массовых расходов компонентов топлива $K_{m\text{ ном}} = 2,47$. Необходимость такой настройки обусловлена технологическим разбросом индивидуальных характеристик дросселей (см. рис. 1) и разбросом коэффициента влияния перепада давления дросселя на отклонение коэффициента соотношения для различных образцов двигателей.

Настройка двигателя производится за счет изменения исходного значения угла α_0 , которое фиксируется в формуляре на настроенный двигатель.

Для статистического моделирования работы исполнительного тракта СУРТ с учетом выбранного выше варианта аппроксимации нелинейной характеристики дросселя и начальной настройки двигателя использовались следующие соотношения:

$$\delta K_m = \delta K_{m\text{ ош}} + \delta K_{m\text{ вф}} + (1 + \beta) \cdot \delta \bar{K}_m - \delta K_{m0},$$

$$\text{где } \delta \bar{K}_m = \begin{cases} b_1(\Delta\alpha + \Delta\alpha_0) + b_2(\Delta\alpha + \Delta\alpha_0)^2, & \text{если } \Delta\alpha + \Delta\alpha_0 \geq 0, \\ b_3(\Delta\alpha + \Delta\alpha_0) + b_4(\Delta\alpha + \Delta\alpha_0)^2, & \text{если } \Delta\alpha + \Delta\alpha_0 < 0, \end{cases}$$

$$\text{и } \delta K_{m0} = (1 + \beta) \cdot \delta \bar{K}_{m0},$$

$$\text{где } \delta \bar{K}_{m0} = \begin{cases} b_1\Delta\alpha_0 + b_2\Delta\alpha_0^2, & \text{если } \Delta\alpha_0 \geq 0, \\ b_3\Delta\alpha_0 + b_4\Delta\alpha_0^2, & \text{если } \Delta\alpha_0 < 0. \end{cases}$$

Здесь введены обозначения:

δK_m – текущее относительное отклонение от номинала коэффициента соотношения массовых расходов компонентов топлива через двигатель;

$\Delta\alpha$ – текущее отклонение от исходного (настроечного) значения α_0 угла α поворота дросселя $\Delta\alpha = \alpha - \alpha_0$;

$\Delta\alpha_0$ – отклонение исходного (настроечного) значения α_0 угла поворота дросселя от номинального $\Delta\alpha_0 = \alpha_0 - \alpha_{\text{ном}}$;

δK_{m0} – изменение величины δK_m при изменении α от номинального положения $\alpha_{\text{ном}}$ на величину $\Delta\alpha_0$ (при отклонении настройки двигателя от номинальной);

β – относительное отклонение от номинала коэффициента $(\partial\delta K_m / \partial\Delta P)$ влияния дроссельного перепада давления на величину δK_m ;

$K_{m\text{ ном}}$ – номинальное значение коэффициента соотношения массовых расходов компонентов топлива;

$\delta K_{m\text{ вф}}$ – текущее изменение величины δK_m из-за воздействия внешних факторов;

$\delta K_{m\text{ ош}}$ – ошибка настройки двигателя на заданное номинальное значение $K_{m\text{ ном}}$.

Из приведенных соотношений следует, что в начале процесса управления при $\Delta\alpha = 0$

$$\delta K_m = \delta K_{m\text{ ош}} + \delta K_{m\text{ вф}}.$$

В приведенной выше модели реальная зависимость коэффициента соотношения расходов компонентов топлива от перепада давления на дросселе аппроксимируется линейной функцией со случайным значением коэффициента пропорциональности, разброс которого характеризуется величиной β .

3. Варианты учета нелинейной характеристики дросселя двигателя ББ

Для формального учета нелинейности характеристики дросселя в алгоритме СУРТ достаточно задать функциональную связь $\Delta\alpha(\delta K_m)$ между вычисленным в алгоритме желаемым текущим значением величины δK_m и требуемым текущим углом поворота дросселя $\Delta\alpha$ относительно исходного положения, так как по текущему и предшествующему значениям координаты $\Delta\alpha$ легко вычисляется требуемая перекладка дросселя в угловом или временном представлении. Поэтому в данном разделе ограничимся описанием следующих возможных вариантов такой связи.

Вариант 1

Простейшим является вариант алгоритма, построенный в предположении линейности связи между указанными координатами и не учитывающий нелинейность характеристики дросселя:

$$\Delta\alpha = C \cdot \delta K_m,$$

где $C = (\partial\delta\bar{K}_m / \partial\Delta\bar{\alpha})_{\text{ном}}$.

Вариант 2

Более сложным является вариант представления функциональной связи $\Delta\alpha(\delta K_m)$ в описанном в разделе 1 виде $\Delta\bar{\alpha}(\delta\bar{K}_m)$ с подстановкой $\Delta\bar{\alpha} = \Delta\alpha$, $\delta\bar{K}_m = \delta K_m$, предполагающей номинальность настройки двигателя $\alpha_0 = \alpha_{\text{ном}} = 49^\circ$, $\Delta\alpha_0 = 0$:

$$\Delta\alpha = a_1\delta K_m - a_2\delta K_m^2, \quad \text{если } \delta K_m \geq 0,$$

$$\Delta\alpha = a_3\delta K_m - a_4\delta K_m^2, \quad \text{если } \delta K_m < 0.$$

Вариант 3

Еще более сложным является вариант представления указанной связи в описанном в разделе 1 виде $\Delta\bar{\alpha}(\delta\bar{K}_m)$ с подстановкой $\Delta\bar{\alpha} = \Delta\alpha + \Delta\alpha_0$, $\delta\bar{K}_m = \delta K_m + \delta K_{m0}$, учитыва-

ющей отличие величины начальной настройки двигателя от её номинального значения $\Delta\alpha_0 = \alpha_0 - \alpha_{\text{ном}}$ (значение α_0 приводится в формулярных данных на конкретный двигатель):

$$\Delta\alpha = a_1(\delta K_m + \delta K_{m0}) - a_2(\delta K_m + \delta K_{m0})^2 - \Delta\alpha_0, \quad \text{если } \delta K_m + \delta K_{m0} \geq 0,$$

$$\Delta\alpha = a_3(\delta K_m + \delta K_{m0}) - a_4(\delta K_m + \delta K_{m0})^2 - \Delta\alpha_0, \quad \text{если } \delta K_m + \delta K_{m0} < 0,$$

где

$$\delta K_{m0} = \begin{cases} b_1\Delta\alpha_0 + b_2\Delta\alpha_0^2, & \text{если } \Delta\alpha_0 \geq 0, \\ b_3\Delta\alpha_0 + b_4\Delta\alpha_0^2, & \text{если } \Delta\alpha_0 < 0. \end{cases}$$

В данном варианте учитывается изменение крутизны нелинейной характеристики дросселя в исходном положении в зависимости от фактической настройки двигателя.

Примечание

При построении данного алгоритма управления двигателем неявно принимаются следующие упрощающие допущения:

- предполагается, что все характеристики отдельных дросселей, расположенные в пределах разброса эквидистантны номинальной характеристике дросселя (см. рис. 1);

- зависимость установившегося значения коэффициента соотношения расходов компонентов топлива от перепада давлений на дросселе является линейной во всем диапазоне изменения перепада давления при управлении.

Возможные отклонения реальной зависимости от линейности моделируются введением параметра β , характеризующего разброс линейной зависимости.

Для адекватного учета реальной характеристики двигателя *методически более правильно* было бы определять значения параметров a_i ($i = 1, 2, \dots, 4$), δK_{m0} экспериментально при индивидуальной стендовой настройке двигателя ББ (с фиксацией указанных значений в формуляре на двигатель), так же, как это делается для семейства двигателей РД 170, РД180, РД190. Попутно при такой настройке может быть учтен и скомпенсирован в алгоритме индивидуальный разброс скорости привода дросселя СУРТ, достигающий 40 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этом разделе проводится анализ динамики и точности работы СУРТ ББ РН «Союз-2» по результатам статистического моделирования на ПЭВМ работы СУРТ в условиях отработки управляющих сигналов системы СОБ при исключении системы регулирования соотношения компонентов (РСК).

Напомним, что система РСК осуществляет поддержание заданного значения коэффициента соотношения δK_v объёмных расходов компонентов топлива в процессе регулирования и компенсирует действие на процесс опорожнения баков ошибки настройки двигателя, а также возмущений по отклонениям от номинальных значений температуры и давлений на входе в двигатель. Поэтому исключение системы РСК из процесса управления опорожнением баков неизбежно повлечет за собой ухудшение точностных характеристик СОБ.

Статистическое моделирование работы СОБ ББ для первого линейного варианта алгоритма управления показало, что требования к точностным характеристикам СОБ ББ не выполняются ни по конечному временному рассогласованию объёмов компонентов топлива ($\Delta t = 0,343$ с в конце процесса регулирования, вместо допустимых $0,3$ с), ни по допустимому отклонению от номинала коэффициента соотношения δK_v объёмных расходов компонентов топлива в процессе регулирования опорожнения баков ББ (до $8,316$ % на последних временных интервалах вместо допустимого ± 7 %).

Статистическое моделирование работы второго варианта алгоритма показало, что требования ТЗ к точностным характеристикам также не выполняются, хотя и с меньшим превышением допустимых значений (в части δK_v), а именно, временное рассогласование объёмов компонен-

тов топлива в конце процесса регулирования $\Delta t = 0,347$ с, а максимальное отклонение от номинала коэффициента соотношения δK_v объёмных расходов компонентов топлива в процессе регулирования составляет ± 7 %.

Для варианта 3 коррекции алгоритма СУРТ временное рассогласование объёмов компонентов топлива в конце процесса регулирования $\Delta t = 0,3$ с, а отклонение от номинала коэффициента соотношения δK_v объёмных расходов компонентов топлива в процессе регулирования не превышает допустимые $\pm 7,0$ %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ приведенных выше результатов моделирования позволяет сделать вывод о целесообразности использования варианта 3 алгоритма, как наиболее совершенного по динамическим и точностным характеристикам работы СУРТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бортовые терминальные системы управления (принципы построения и элементы теории) / Б.Н. Петров, Ю.П. Портнов-Соколов, А.Я. Андриенко, В.П. Иванов. М.: Машиностроение, 1983. 200 с.
2. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. М.: Издательство физико-математической литературы, 1958. 338 с.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ELIMINATION OF COMPONENT RATIO CONTROL SYSTEM ON DYNAMICS AND ACCURACY OF OPERATION OF SIDE UNITS FUEL CONSUMPTION CONTROL SYSTEM IN SIDE BLOCKS OF THE LAUNCH VEHICLE "SOYUZ-2"

© 2020 V.P. Ivanov, V.K. Zavadskiy, A.A. Myranov, E.I. Tropova, A.I. Chadaev

V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow

The article presents the results of the study of the effect of accounting on the nonlinearity of the characteristics of the throttles of the side blocks of the launch vehicle "Soyuz-2" on dynamic and accurate characteristics of fuel consumption control system operation. When the component ratio control system (RCS) is excluded from the fuel composition control system of side units, the accuracy of implementation of control commands calculated in the LSC algorithm begins to be influenced by technological scattering of angular speed of rotation of various samples of throttles of side units, non-linearity and technological spread of characteristics of the throttles, which determine the dependence of pressure drop values on throttle on the throttle angle, etc. In order to assess the consequences of exclusion of the RCS system from the fuel consumption control system of the side units, an analytical dependence was selected for approximation of the throttle characteristic and its parameters were calculated, the simulation model of the control object was adjusted to take into account additional disturbances factors, simulation models of the side block engine control algorithm were formed and investigated (using PC simulation) and recommendations were made on using of variant of algorithm that provides the most advanced dynamic and accurate characteristics the fuel consumption control system of the side block operation.

Keywords: Fuel consumption control system, method of least squares, nonlinear characteristic of a throttle, dynamic and accurate characteristics of fuel consumption control system operation.

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-4-98-103

Vladimir Ivanov, Doctor of Technics, Head of the Laboratory Terminal Control Systems. E-mail: vladguc@ipu.rssi.ru
Vladimir Zavadskiy, Candidate of Technics, Senior Research Associate of the Laboratory Terminal Control Systems. E-mail: vladguc@ipu.rssi.ru
Anatoliy Muranov, Candidate of Technics, Senior Research Associate of the Laboratory Terminal Control Systems.

E-mail: vladguc@ipu.rssi.ru
Elena Tropova, Research Associate of the Laboratory Terminal Control Systems. E-mail: vladguc@ipu.rssi.ru
Aleksandr Chadaev, Candidate of Technics, Senior Research Associate of the Laboratory Terminal Control Systems. E-mail: vladguc@ipu.rssi.ru