

ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ВЫВЕДЕНИЯ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ «СОЮЗ-2» ПУТЕМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЫРАБОТКИ ТОПЛИВА НА МНОГОБЛОЧНОЙ I СТУПЕНИ

А.И. Чадаев, Е.И. Тропова

Рассмотрены возможные алгоритмы прогнозирования выработки топлива боковых блоков применительно к работе многоблочной I ступени ракеты-носителя «Союз-2». Приведены результаты сравнительного анализа точностных характеристик работы рассмотренных алгоритмов прогнозирования для некоторых нештатных ситуаций.

Ключевые слова: ракета-носитель, система прогнозирования выработки топлива, алгоритм управления, нештатная ситуация.

ВВЕДЕНИЕ

Прогнозирование выработки топлива в процессе полета ракеты-носителя (РН) осуществляется как с целью повышения энергетики РН, так и обеспечения безопасности ее выведения [1, 2]. Обеспечение безопасности полета РН с помощью системы прогнозирования выработки топлива (СПВ) имеет две составляющие. Первая из них — предотвращение риска возникновения пожара при работе двигательной установки в условиях прекращения поступления одного из компонентов топлива. Вторая — обеспечение падения отработавшей ступени в заданные районы при нештатном прерывании работы ее двигателей.

Решение этих двух задач в условиях работы I ступени РН «Союз-2» порождает определенные сомнения в целесообразности применения СПВ.

Прежде всего, на двигателях боковых блоков (ББ) предусмотрен процесс самовыключения при выработке какого-либо компонента топлива.

Далее, близость траектории полета I ступени к траектории «стрельбы на предельную дальность» делает практически невозможным приведение (посредством управления углом тангажа РН на активном участке полета) точки падения I ступени в неизменный район при преждевременном выключении двигателей.

И тем не менее, прогнозирование момента времени выключения двигателей (в момент выработки одного из компонентов топлива) может оказаться весьма полезным при наличии на трассе полета I ступени запретных (например, густонаселенных) зон падения отработавших блоков РН.

ВАРИАНТЫ АЛГОРИТМОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЫРАБОТКИ ТОПЛИВА

Применительно к задаче обеспечения безопасности выведения РН рассматривались три алгоритма действия СПВ I ступени:

— алгоритм 1, прогнозирующий момент времени T выработки суммарного топлива многоблочной I ступени;

— алгоритм 2, прогнозирующий моменты времени T_l , $l = 1, 2, \dots, 4$, выработки топлива каждого l -го ББ I ступени;

— алгоритм 3, осуществляющий прогнозирование моментов времени T_l^O и T_l^Γ , $l = 1, 2, \dots, 4$, опорожнения баков окислителя и горючего каждого из ББ.

В основе всех трех алгоритмов лежит унифицированная процедура обработки входных сигналов t_{il}^O , t_{il}^Γ , $l = 1, 2, \dots, 4$, — моментов времени срабатывания i -х, $i = 1, 2, \dots, 32$, чувствительных элементов (ч. э.) уровнемеров окислителя и горючего l -го бокового блока I ступени:

$$X_i = x_i + T_i(1 + \lambda_i), \quad i = 1, 2, \dots, 32;$$

$$\lambda_i = \lambda_{i-1} + \Delta\lambda_i, \quad \lambda_0 = 0;$$

$$\Delta\lambda_i = \begin{cases} 0, & i = 1, \\ C(D_i\Delta\tau_i - \Delta\tau_{i-1}), & i > 1, \end{cases}$$

$$\Delta\tau_i = \tau_i - x_i;$$

$$x_i = \begin{cases} t_1, & i = 1, \\ x_{i-1} + (T_{i-1} - T_i)(1 + \lambda_{i-1}), & i > 1, \end{cases}$$

где C, D_i — выбираемые для каждого варианта алгоритма действия СПВ параметры, обеспечивающие исполнение заданных требований к точности прогнозирования; t_1 — номинальный момент времени срабатывания первого ч. э. уронемеров компонентов топлива ББ; T_i — номинальный интервал времени от момента срабатывания i -го ч. э. уронемеров компонентов топлива ББ до момента полной выработки топлива.

При реализации алгоритма 1:

$X_i = T_i^{\text{пп}}$ — прогнозируемое в i -й дискретный момент времени значение T ,

$$\tau_i = \frac{1}{4(K_m + 1)} \sum_{l=1}^4 (K_m t_{il}^O + t_{il}^{\Gamma});$$

при реализации алгоритма 2:

$X_i = T_{il}^{\text{пп}}$ — прогнозируемое в i -й дискретный момент времени значение $T_p, l = 1, 2, \dots, 4$,

$$\tau_i = \frac{1}{K_m + 1} (K_m t_{il}^O + t_{il}^{\Gamma});$$

при реализации алгоритма 3:

$X_i = T_{il}^{\text{Опп}}$ (либо $T_{il}^{\Gamma\text{пп}}$) — прогнозируемое в i -й момент времени значение T_l^O (либо T_l^{Γ}),

$l = 1, 2, \dots, 4$,

$$\tau_i = t_{il}^O \text{ (либо } t_{il}^{\Gamma}).$$

Здесь K_m — номинальное соотношение массовых расходов компонентов топлива ББ; промежуточные переменные $x_p, \lambda_p, \Delta\lambda_p, \Delta\tau_i$ определяются рекуррентным образом при поступлении входных сигналов $t_{il}^O, t_{il}^{\Gamma}$.

Для определенности на многоблочной I ступени принимаем, что при выработке одного из компонентов топлива первого (по времени) двигателя система управления РН практически сразу выключает и остальные двигатели ступени, и тогда в качестве выходной координаты СПВ можно принять прогнозируемый момент $T_i^{\text{пп}}$ времени выключения двигателей I ступени, формируемый по правилу

$$T_i^{\text{пп}} = \begin{cases} T_{32}^{\text{пп}} & \text{— в алгоритме 1,} \\ \min_l \{ T_{32l}^{\text{пп}}, l = 1, 2, \dots, 4 \} & \text{— в алгоритме 2,} \\ \min_l \{ \min(T_{il}^{\text{Опп}}, T_{il}^{\Gamma\text{пп}}), l = 1, 2, \dots, 4 \} & \text{— в алгоритме 3.} \end{cases}$$

Вероятностное оценивание точностных характеристик СПВ проводилось посредством статис-

тического моделирования работы СПВ совместно с системами внутриблочного регулирования опорожнения баков (СОБ) боковых блоков, системой управления межблочной синхронизацией опорожнения баков и системой регулирования кажущейся скорости (РКС) РН «Союз-2».

Моделирование выполнялось применительно к штатной ситуации выведения РН и к трем типам нештатных ситуаций, связанных с преждевременным, сравнительно с штатным выключением, прекращением работы двигателей I ступени:

- ситуации 1, не приводящей к меж- и внутриблочной рассинхронизации опорожнения баков;
- ситуации 2, приводящей к межблочной рассинхронизации опорожнения баков;
- ситуации 3, приводящей к внутриблочной рассинхронизации опорожнения баков.

Конкретно, ситуация 1 имитировалась повреждениями в системе РКС с выдачей ложного сигнала на дросселирование двигателей I ступени, ситуация 2 — выходом из строя (обрывом цепи питания) привода винта газового редуктора в одном из ББ, ситуация 3 — выходом из строя дросселя СОБ одного из ББ. Результаты моделирования представлены в таблице.

Как следует из первого числового столбца этой таблицы, по точности прогнозирования в штатной ситуации выведения (и в нештатной 1) алгоритмы 1—3 весьма слабо различаются между собой, и если бы рассматривался вопрос о реализации полной выработки топлива I ступени для повышения штатной грузоподъемности РН, предпочтение следовало бы отдать алгоритму 2 — прогнозированию выработки топлива каждого из боковых блоков. Но применительно к задаче обеспечения безопасности выведения алгоритм 1 оказывается практически неработоспособным в нештатных ситуациях 2 и 3, а алгоритм 2 — в нештатной ситуации 3 (см. две первые числовые строки таблицы). Зато фактически инвариантным (по точности прогнозирования) к нештатности ситуаций выведения оказывается алгоритм 3 (см. последнюю стро-

Результаты моделирования

Вариант алгоритма СВР I ступени	Статистически предельная погрешность прогнозирования момента времени выключения двигателей I ступени при выработке одного из компонентов топлива в ситуациях выведения РН		
	штатной и нештатной 1, с	нештатной 2, с	нештатной 3, с
Алгоритм 1	0,25	3,92	5,07
Алгоритм 2	0,23	0,22	5,06
Алгоритм 3	0,24	0,24	0,24



ку таблицы), реализующий прогнозирование моментов выработки компонентов топлива каждого из баков ББ с последующим выделением наименьшего из этих восьми моментов. Отметим, что приведенные в последней строке таблицы значения статистически предельной погрешности прогнозирования полностью соответствуют точностным требованиям, предъявляемым к работе системы СПВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в нештатной ситуации при формировании в системе управления I ступени ракеты-носителя «Союз-2» команды на выключение двигателей, позволяющей избежать падения отработавших боковых блоков в запретные зоны, необходимо применять алгоритм 3 уровнемерного прогнозирования (с погрешностью 0,24 с) момента времени выключения двигателей I ступени по выработке одного из компонентов топлива.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андриенко А.Я., Портнов-Соколов Ю.П., Чадаев А.И. Критерии выбора облика перспективных средств гарантированного выведения на орбиту // Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем. Процессы, модели, эксперимент. Российско-американский научный журнал. — 2003. — Т. 8, вып. 1 (15). — С. 1—8.
2. Чадаев А.И., Тропова Е.И. Прогнозирование выработки топлива — способ повышения безопасности выведения РН // Материалы 35-й Всероссийской конференции по проблемам науки и технологий, посвященной 70-летию Победы. Миасс, 2015. — М., 2015. — Т. 4. — С. 30—35.

Сообщение представлено к публикации членом редколлегии Б.В. Павловым.

Чадаев Александр Иванович — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник,

Тропова Елена Ивановна — науч. сотрудник,

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ✉ vladguc@ipu.ru.