

УДК 629.78.082.6.05

АНАЛИЗ СЛОЖНОГО ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ РАСХОДОМ ТОПЛИВА ГЕОСТАЦИОНАРНОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «ЯМАЛ»

© 2013 г. Ковтун В.С.

ОАО «Ракетно-космическая корпорация “Энергия” имени С.П. Королёва» (РКК «Энергия»)
Ул. Ленина, 4А, г. Королёв, Московская область, Россия, 141070, e-mail: post@rsce.ru

Девятого августа 2010 года, после успешного завершения программы полета и увода на орбиту «захоронения», был принудительно прекращен более чем 10-летний полет геостационарного космического аппарата «Ямал-100». Успешному завершению полета во многом способствовало решение задачи эффективного расхода топлива реактивных двигателей. В статье представлен метод анализа, применяемый в рамках методологии «варибельного» управления расходом топлива реактивных двигателей, позволивший оптимальным образом производить расход топлива при выполнении программы полета космического аппарата.

Ключевые слова: варибельное управление, декомпозиция процесса, стратификация, кластеры, иерархическая структура, матричный метод анализа иерархий, матрица суждений, нормализованный вектор матрицы, согласованность суждений, вектор приоритетов.

ANALYSIS OF COMPLEX PROCEDURE – FUEL CONSUMPTION MANAGEMENT FOR «YAMAL» GEOSTATIONARY SPACECRAFT

Kovtun V.S.

S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia (RSC Energia)
4A Lenin Street, Korolev, Moscow region, 141070, Russia, e-mail: post@rsce.ru

On the ninth of August 2010, after successful completion of its flight program and its transfer to a disposal orbit, more than 10 years of in-orbit operation of “Yamal-100” geostationary spacecraft were forcibly brought to an end.

The successful completion of this mission was achieved to a large extent owing to the correct solution of the problem of efficient fuel consumption by the thrusters. This paper presents an analysis method used in the framework of “variable” methodology of thruster fuel consumption management, which enabled optimum fuel consumption in the course of the spacecraft mission.

Key words: variable management, decomposition process, stratification, clusters, hierarchy, matrix method of hierarchy analysis, judgment matrix, matrix normalized vector, judgment coordination, vector of priorities.



КОВТУН В.С.

КОВТУН Владимир Семенович – ктн, начальник отделения РКК «Энергия», e-mail: vladimir.s.kovtun@rsce.ru

KOVTUN Vladimir Semenovich – Candidate of Science (Engineering), Head of Department at RSC Energia

В рамках методологии вариабельного управления расходом топлива реактивных двигателей (РД) производилась стратификация сложного процесса управления полетом космического аппарата (КА) [1, 2]. Стратификация сложного процесса управления полетом КА – это метод разделения происходящих на борту КА процессов на страты (слои) для последующего изучения и исследования горизонтальных взаимосвязей между происходящими на борту явлениями в иерархии сложных процессов. При этом РД состоят из электроракетных двигателей (ЭРД) типа стационарных плазменных двигателей (СПД) и газовых двигателей (ГД).

Далее на разных уровнях иерархии процессы объединялись для последующего анализа с целью определения агрегатов, обеспечивающих оптимальный расход топлива на различных интервалах полетного времени. Поиск агрегатов производился с использованием метода анализа иерархий (МАИ), рассмотренного в данной статье применительно к реальным условиям выполнения программы полета КА «Ямал».

В основе методологии в целом лежит управление процессами, происходящими на борту КА и имеющими опосредованное влияние на расход топлива.

Стратификация процесса управления расходом топлива на борту космического аппарата

Стратификация сложного процесса управления расходом топлива РД КА «Ямал» [1, 2] для оценивания расхода топлива с использованием МАИ приводится к агрегатному виду. При этом в агрегат сложного процесса управления расходом топлива A^0 , на уровне первой страты S_1 , включены три базовых процесса (БП) B_i^0 ($i = 1, 2, 3$):

- B_1^0 – движение КА около центра масс, $B_1^0 \subset A^0$ [3];
- B_2^0 – движение центра масс космического аппарата, $B_2^0 \subset A^0$ [4, 5];
- B_3^0 – хранение и подача топлива (ксенона Хе), $B_3^0 \subset A^0$ [6].

В каждый БП из уровня второй страты S_2 инвестируются по три объекта анализа, состоящих из системных процессов C_j^0 ($j = 1, 2, \dots, 9$) или их кластеров \bigcup_j , объединенных по целевому

назначению и рассматриваемых при анализе как самостоятельные единицы:

- C_1^0 – работа системы тяговых модулей (СТМ), $C_1^0 \in B_1^0$ [7];
- $\bigcup_{j=1,2} C_j^0$ – работа СТМ C_1^0 и системы газовых двигателей (СГД) C_2^0 , $\bigcup_{j=1,2} C_j^0 \subset B_1^0$ [7, 8];

- $\bigcup_{j=1,3} C_j^0$ – работа СТМ C_1^0 и системы ориентации солнечных батарей (СОСБ) C_3^0 , $\bigcup_{j=1,3} C_j^0 \subset B_1^0$ [3, 5, 7];

- C_4^0 – работа СТМ, $C_4^0 \subset B_2^0$ [7, 9];

- $\bigcup_{j=4,5} C_j^0$ – работа СТМ C_4^0 и СГД C_5^0 , $\bigcup_{j=4,5} C_j^0 \subset B_2^0$ [7, 8];

- $\bigcup_{j=4,6} C_j^0$ – работа СТМ C_4^0 и СОСБ C_6^0 , $\bigcup_{j=4,6} C_j^0 \subset B_2^0$ [3, 5, 7];

- C_7^0 – контроль расхода топлива в системе хранения и подачи (СХП) при работе СТМ, $C_7^0 \subset B_3^0$ [6];

- C_8^0 – контроль расхода топлива в СХП при работе СГД, $C_8^0 \subset B_3^0$ [6];

- C_9^0 – контроль расхода топлива в СХП при его хранении, $C_9^0 \subset B_3^0$ [6, 10].

В каждый системный процесс из уровня третьей страты S_3 инвестируются по три объекта анализа, состоящих из элементных процессов D_k^0 или их кластеров \bigcup_k ($k = 1, 2, \dots, 27$),

объединенных по целевому назначению и рассматриваемых при анализе как самостоятельные объекты. Также приводятся ссылки на процессы, инвестируемые из страты четвертого уровня S_4 в S_3 . При этом введены обозначения E_p^0 процессов страты четвертого уровня S_4 и их кластеров \bigcup_p [1, 2]. Состав инвестируемых про-

цессов следующий:

- D_1^0 – работа блока автоматики тяговых модулей (БАТМ) и стационарных плазменных двигателей в составе тяговых модулей (ТМ): $\bigcup_{p=1,2} E_{1p}^0 \in D_1^0 \subset C_1^0$ (процессы внутри элементов –

«разрядный ток» СПД E_{11}^0 , «броски разрядного тока» СПД E_{12}^0) [7, 9, 11];

- D_2^0 – работа блока электропитания

(БЭП) $\bigcup_{p=1,2} E_{2p}^0 \in D_2^0 \subset C_1^0$ (процессы внутри эле-

ментов – «разрядное напряжение» E_{21}^0); работа БАТМ $E_{22}^0 \in D_2^0 \subset C_1^0$ (процессы внутри элементов – «разрядный ток» E_{22}^0) [7, 11];

- D_3^0 – работа ТМ, $\bigcup_{p=1,2} E_{3p}^0 \in D_3^0 \subset C_1^0$ (про-

цессы внутри элементов в БАТМ и блоке газораспределения (БГ) ТМ – поддержание в СПД номинального «разрядного тока» E_{31}^0 и «давления во входной магистрали» БГ в составе ТМ E_{32}^0) [7];

- D_4^0 – объединение трех процессов в кластере $D_4^0 \subset C_2^0$: дискретная работа ГД D_{41}^0 , работа электронагревателей (ЭН) на кронштейне ГД D_{42}^0 и на магистралях подачи топлива D_{43}^0 ;

$$\bigcup_{k=1,2,3} D_{4k}^0 \subset D_4^0 [6, 8];$$

- D_5^0 – объединение двух процессов в кластере $D_5^0 \subset C_2^0$: дискретная работа ГД, работа ЭН на кронштейне ГД, $\bigcup_{k=1,2} D_{5k}^0 \subset D_5^0 [6, 8];$

- D_6^0 – дискретная работа ГД, $D_6^0 \subset C_2^0 [8];$

- D_7^0 – объединение трех процессов в кластере $D_7^0 \subset C_3^0$: работа силы светового давления (ССД) на поверхности солнечной батареи (СБ) D_{71}^0 , магнитного момента (ММ) СБ D_{72}^0 и привода (ПД) СБ D_{73}^0 , $\bigcup_{k=1,2,3} D_{7k}^0 \subset D_7^0 [3, 5, 12];$

- D_8^0 – объединение двух процессов в кластере $D_8^0 \subset C_3^0$: работа ССД на поверхности СБ D_{81}^0 и ПД СБ D_{82}^0 , $\bigcup_{k=1,2} D_{8k}^0 \subset D_8^0 [3, 5];$

- D_9^0 – объединение двух процессов в кластере $D_9^0 \subset C_3^0$: работа ММ СБ D_{91}^0 и ПД СБ D_{92}^0 , $\bigcup_{k=1,2} D_{9k}^0 \subset D_9^0 [12];$

- D_{10}^0 – работа БЭП, $\bigcup_{p=1,2} E_{10p} \in D_{10}^0 \subset C_4^0$

(процессы внутри элементов – «разрядное напряжение» СПД E_{101}^0), работа БАТМ (процесс внутри элемента – «разрядный ток» СПД E_{102}^0) [7, 8, 11];

- D_{11}^0 – работа ТМ, $\bigcup_{p=1,2} E_{11p} \in D_{11}^0$ (процессы внутри элементов в БАТМ и БГ – поддержание в СПД номинальных «разрядного тока» СПД E_{111}^0 и давления во входной магистрали БГ E_{112}^0) [7, 8];

• D_{12}^0 – работа БАТМ и броски «разрядного тока» в СПД E_{121}^0 , $\bigcup_{p=1,2} E_{122}^0 \in D_{12}^0 \subset C_4^0 [7, 8, 11];$

- D_{13}^0 – объединение четырех процессов в кластере $D_{13}^0 \subset C_5^0$: непрерывная работа двух ГД D_{131}^0 , D_{132}^0 ; работа ЭН на кронштейне ГД D_{133}^0 и на магистралях подачи топлива D_{134}^0 ;

$$\bigcup_{k=1,2,3,4} D_{13k}^0 \subset D_{13}^0 [8, 10];$$

$$\bigcup_{k=1,2,3,4} D_{13k}^0 \subset D_{13}^0 [8, 10];$$

- D_{14}^0 – объединение четырех процессов в кластере $D_{14}^0 \subset C_5^0$: дискретная работа ГД D_{141}^0 , D_{142}^0 ; работа ЭН на кронштейне ГД D_{143}^0 и на магистра-

лях подачи топлива D_{144}^0 , $\bigcup_{k=1,2,3,4} D_{14k}^0 \subset D_{14}^0 [8, 10];$

- D_{15}^0 – объединение четырех процессов в кластере $D_{15}^0 \subset C_5^0$: дискретная последовательная работа двух ГД D_{151}^0 , D_{152}^0 ; работа ЭН на

кронштейне ГД D_{153}^0 и на магистралях подачи

топлива D_{154}^0 , $\bigcup_{k=1,2,3,4} D_{15k}^0 \subset D_{15}^0 [8, 10];$

- D_{16}^0 – объединение двух процессов в кластере $D_{16}^0 \subset C_6^0$: работа СБ в качестве «двигателя КА» D_{161}^0 и работа СБ по разгрузке маховиков от накопленного кинетического момента D_{162}^0 , $\bigcup_{k=1,2} D_{16k}^0 \subset D_{16}^0 [5];$

- D_{17}^0 – работа СБ по разгрузке маховиков от накопленного кинетического момента, $D_{17}^0 \subset C_6^0 [3];$

- D_{18}^0 – работа ММ при ориентации СБ на Солнце, $D_{18}^0 \subset C_6^0 [12];$

- D_{19}^0 – контроль расхода топлива по разрядному току СПД, $D_{19}^0 \subset C_7^0 [8, 9];$

- D_{20}^0 – контроль расхода топлива по разрядному току и напряжению СПД, $D_{20}^0 \subset C_7^0 [8, 9];$

- D_{21}^0 – контроль расхода топлива по разрядному току и напряжению СПД с учетом бросков разрядного тока, $D_{21}^0 \subset C_7^0 [8, 9, 11];$

- D_{22}^0 – контроль расхода топлива в магистралях объединенной двигательной установки (ОДУ) по характеристикам, которые оказывали заметное влияние на расход топлива (температура и давление), с учетом теплофизических характеристик Хе (вириальные коэффициенты газа), $D_{22}^0 \subset C_8^0 [6];$

- D_{23}^0 – контроль расхода топлива в магистралях ОДУ по бародинамическим характеристикам (температура и давление), $D_{23}^0 \subset C_8^0 [6];$

- D_{24}^0 – контроль расхода топлива в магистралях ОДУ по газодинамическим параметрам ГД, $D_{24}^0 \subset C_8^0 [6];$

- D_{25}^0 – контроль герметичности в магистралях ОДУ по электродинамическим параметрам СПД, $D_{25}^0 \subset C_9^0 [6, 8, 13];$

- D_{26}^0 – контроль герметичности в магистралях ОДУ по температуре и давлению, с учетом теплофизических характеристик Хе (вириальные коэффициенты газа), $D_{26}^0 \subset C_9^0 [6];$

- D_{27}^0 – контроль герметичности в баках ОДУ по заправочным характеристикам топлива (Хе), $D_{27}^0 \subset C_9^0 [6].$

Анализ сложного процесса управления расходом топлива

Построение иерархической структуры сложного процесса управления расходом топлива и последующая его стратификация позволили использовать для оценочных суждений МАИ [1, 2].

В начале анализа управления расходом топлива его запас размещается в агрегате A^0 , составленном из процессов B_1^0, B_2^0, B_3^0 . Матрица суждений, сформированная в соответствии с

ранее принятым методом оценки процессов для A^0 , представлена в табл. 1, где введены обозначения собственного и обратного нормализованных векторов матрицы (СНВ и ОНВ).

Таблица 1

Матрица размещения запасов топлива по БП

A^0	B_1^0	B_2^0	B_3^0	СНВ	ОНВ
B_1^0	1	8	9	0,76	0,06
B_2^0	1/8	1	9/8	0,16	0,44
B_3^0	1/9	8/9	1	0,08	0,50

Цифрами обозначены суждения об относительном распределении топлива на выполнение программы полета (ПП) КА «Ямал» при общем запасе 90 кг и проектном распределении на реализацию БП B_1^0 , B_2^0 , B_3^0 . При этом весовому коэффициенту 1 соответствует 10 кг топлива. В табл. 1 СНВ определяет приоритет суждений по размещаемому запасу топлива – больший приоритетный коэффициент соответствует меньшему необходимому расходу. А ОНВ распределяет приоритеты по необходимости экономии топлива в процессе управления. Индекс согласованности суждений I_{ss} близок к нулю, из чего следует высокая точность суждений [1].

По вектору приоритетов (ВП) расхода запасов топлива, определенному как ОНВ матрицы A^0 , отдается предпочтение процессу B_3^0 . Это полностью согласуется с логикой управления запасами топлива, так как его потери из-за несанкционированного расхода в наибольшей степени влияют на достижение полетных целей. Далее производится оценка построенной иерархической структуры для принятых вариантов управления расходом топлива через трансформацию системных процессов (страта 2-го уровня, С2).

Матрица суждений, сформированная для процесса B_1^0 , представлена в табл. 2. Исходным для формирования матрицы являлся прогнозируемый расход топлива на фиксированном (месячном) отрезке полетного времени $[t_0, t_k]$ при трех возможных вариантах выполнения управления движением КА около центра масс с использованием: тяговых модулей, $C_1^0 - 0,02$ кг; кластер «ТМ + ГД», $\bigcup_{j=1,2} C_j^0 - 0,041$ кг; кластер

«ТМ + СОСБ», $\bigcup_{j=1,3} C_j^0 - 0,012$ кг. Оценка произ-

водилась с учетом возможных вариантов изменения протекания сложного процесса управления полетом космического аппарата в целом.

Таблица 2

Матрица суждений по расходу топлива при реализации БП «Движение КА около центра масс»

B_1^0	C_1^0	$\bigcup_{j=1,2} C_j^0$	$\bigcup_{j=1,3} C_j^0$	ВП
C_1^0	1	1/2,1	1/0,6	0,32
$\bigcup_{j=1,2} C_j^0$	2,1	1	2,1/0,6	0,15
$\bigcup_{j=1,3} C_j^0$	0,6	0,6/2,1	1	0,53

При этом, в соответствии с МАИ, при использовании кластера, состоящего из нескольких процессов, сравнивался расход в каждом процессе отдельно. Вариант шкалы 2×2 представлен в табл. 3, при этом расход топлива на выполнение ПП составил на ТМ $\approx 0,011$ кг и на ГД $\approx 0,03$ кг.

Таблица 3

Матрица суждений по распределению расхода топлива при управлении на ТМ и ГД в кластере «ТМ + ГД» и реализации БП «Движение КА около центра масс»

$\bigcup_{j=1,2} C_j^0$	ТМ	ГД	ВП
ТМ	1	2,71	0,73
ГД	0,37	1	0,27

Аналогично была сформирована матрица приоритетов для кластера $\bigcup_{j=1,3} C_j^0$ (табл. 4). Расход топлива составил на ТМ $\approx 0,02$ кг и на ТМ + СОСБ $\approx 0,012$ кг.

Таблица 4

Матрица суждений по распределению расхода топлива при управлении с использованием ТМ или в кластере «ТМ + СОСБ» и реализации БП «Движение КА около центра масс»

$\bigcup_{j=1,3} C_j^0$	ТМ	ТМ + СОСБ	ВП
ТМ + СОСБ	1	1,71	0,63
ТМ	0,60	1	0,37

Для получения обобщенного вектора расхода топлива по двум кластерам процесса B_1^0 «Движение КА около центра масс», в соответствии с МАИ, значения ВП в табл. 3 умножались на значение приоритетного коэффициента 0,15, соответствующего приоритету кластера «ТМ + ГД», $\bigcup_{j=1,2} C_j^0$ (см. табл. 2).

Аналогично значения ВП в табл. 4 умножались на значение приоритетного коэффициента 0,53 соответствующего кластера «ТМ + СОСБ», $\bigcup_{j=1,3} C_j^0$ (см. табл. 2).

В результате было получено обобщенное распределение приоритетов, представленное в табл. 5.

Таблица 5

Матрица суждений по распределению расхода топлива внутри кластеров в составе БП «Движение КА около центра масс»

$\bigcup_{j=1,2} C_j^0$		$\bigcup_{j=1,3} C_j^0$	
ТМ	0,11	ТМ + СОСБ	0,33
ГД	0,04	ТМ	0,20

В соответствии с МАИ сформирована матрица суждений для процесса B_2^0 (табл. 6). При этом прогнозируемый расход топлива на фиксированном отрезке полетного времени $[t_0, t_k]$ для трех возможных вариантов реализации процесса «Движение центра масс КА» составил на: ТМ $C_4^0 - 1,3$ кг; «ТМ + ГД», $\bigcup_{j=4,5} C_j^0 - 9,1$ кг; «ТМ + СОСБ», $\bigcup_{j=4,6} C_j^0 - 1,2$ кг.

Таблица 6

Матрица суждений по расходу топлива при реализации БП «Движение центра масс КА»

B_2^0	C_4^0	$\bigcup_{j=4,5} C_j^0$	$\bigcup_{j=4,6} C_j^0$	ВП
C_4^0	1	1/7	1/0,9	0,40
$\bigcup_{j=4,5} C_j^0$	7	1	7/0,9	0,16
$\bigcup_{j=4,6} C_j^0$	0,9	0,9/7	1	0,44

Отдельная оценка кластера $\bigcup_{j=4,5} C_j^0$ представлена в табл. 7. Расход топлива составил при регулировании процесса движения КА с использованием ТМ $\approx 1,05$ кг и ГД $\approx 8,05$ кг.

Таблица 7

Матрица суждений по распределению расхода топлива при управлении на ТМ и ГД в кластере «ТМ + ГД» и реализации БП «Движение центра масс КА»

$\bigcup_{j=4,5} C_j^0$	ТМ	ГД	ВП
ТМ	1	7,67	0,88
ГД	0,13	1	0,12

Отдельная оценка кластера $\bigcup_{j=4,6} C_j^0$ представлена в табл. 8. Расход топлива составил при регулировании процесса движения КА с использованием ТМ $\approx 1,3$ кг и «ТМ + СОСБ» $\approx 1,2$ кг.

Таблица 8

Матрица суждений по распределению расхода топлива при управлении с использованием ТМ или в кластере «ТМ + СОСБ» и реализации БП «Движение центра масс КА»

$\bigcup_{j=4,6} C_j^0$	ТМ	ТМ + СОСБ	ВП
ТМ + СОСБ	1	1,08	0,52
ТМ	0,92	1	0,48

Для получения обобщенного вектора расхода топлива по двум кластерам процесса B_2^0 «Движение центра масс КА», значения ВП (табл. 7) умножались на значение приоритетного коэффициента 0,16, соответствующего приоритету кластера «ТМ + ГД» $\bigcup_{j=4,5} C_j^0$ (табл. 6),

и аналогично значение ВП (табл. 8) умножалось на значение приоритетного коэффициента 0,44, соответствующего приоритету кластера «ТМ + СОСБ» $\bigcup_{j=4,6} C_j^0$ (табл. 6). Результаты суждений приведены в табл. 9.

Таблица 9

Матрица суждений по распределению расхода топлива внутри кластеров в составе БП «Движение центра масс КА»

$\bigcup_{j=4,5} C_j^0$		$\bigcup_{j=4,6} C_j^0$	
ТМ	0,14	ТМ + СОСБ	0,23
ГД	0,02	ТМ	0,21

Для формирования матрицы суждений по процессу B_3^0 контроля расхода топлива в СХП на фиксированном отрезке полетного времени $[t_0, t_k]$ определялся возможный расход через допустимые потери топлива при протекании системных процессов C_7^0, C_8^0, C_9^0 . При этом допустимые значения негерметичности в i -х замкнутых объемах СХП при протекании системных процессов C_7^0, C_8^0, C_9^0 [6] умножались на продолжительность каждого из указанных системных процессов на вышеприведенном отрезке с последующим суммированием. Допустимые значения негерметичности определялись через массовый расход $G_{i\max} = \rho_i q_{i\max} / P_i$,

где ρ_i – плотность Хе; $q_{i\max}$ – допустимое значение утечки газообразного Хе; P_i – давление в контролируемом объеме. В результате были получены, например, значения допустимых потерь топлива $\sim 2,3$ г; $\sim 0,3$ г; $\sim 0,2$ г, которые соответствуют системным процессам C_7^0 , C_8^0 , C_9^0 соответственно.

По принятому методу сформирована матрица суждений, представленная в табл. 10.

Таблица 10

Матрица суждений по допустимым потерям топлива в СХП

B_3^0	C_7^0	C_8^0	C_9^0	ВП
C_7^0	1	1/8	1/12	0,83
C_8^0	8	1	8/12	0,10
C_9^0	12	12/8	1	0,07

Из табл. 10 следует, что наибольшее внимание на отрезке времени $[t_0, t_k]$ выполнения ПП необходимо уделять контролю СХП при работе СТМ, так как допустимые потери топлива в этом процессе могут быть наибольшими.

Далее был выполнен анализ влияния элементарных процессов на расход топлива. Каждый ТМ (всего восемь) имеет, как правило, свои отличительные регулировочные характеристики, которые определяют расход топлива [8, 10]. Для разгрузки маховиков от накопленного кинетического момента можно выбирать по указанным характеристикам один из ТМ, установленных на КА.

Апостериорный анализ показал, что секундный массовый расход топлива для одной и той же разгрузки зависит от выбора ТМ по регулировочным характеристикам и может составить: по разрядному току при наличии бросков тока разряда СПД (процесс D_1^0) – $5,4 \cdot 10^{-5}$ кг/с; по разрядному напряжению и току без наличия бросков тока СПД (процесс D_2^0) – $2,2 \cdot 10^{-5}$ кг/с; по разрядному току без наличия бросков тока СПД (процесс D_3^0) – $3,6 \cdot 10^{-5}$ кг/с.

При этом необходимо отметить, что явления «бросков тока разряда» наблюдались в СПД при работе всех ТМ [11]. Для анализа выбирались только те ТМ, в которых проявление «бросков тока разряда» происходило в первые 15 с их работы. Указанного времени было необходимо и достаточно для выполнения разгрузки маховиков.

По результатам анализа матрица суждений системного процесса C_1^0 , в состав которого включены процессы элементов D_1^0 , D_2^0 , D_3^0 , приняла вид, представленный в табл. 11.

Таблица 11

Матрица суждений по расходу топлива при реализации системного процесса работы ТМ

C_1^0	D_1^0	D_2^0	D_3^0	ВП
D_1^0	1	2,2	1,5	0,21
D_2^0	1/2,2	1	2,2/1,5	0,47
D_3^0	1/1,5	1,5/2,2	1	0,32

На основе аналогичных суждений производилось построение матриц по другим системным процессам $C_2^0 - C_9^0$. В результате получено иерархическое построение матриц суждений по вариантам управления расходом топлива, представленное ниже на рис. 1–3. Для всех приведенных матриц суждений $I_{ss} \approx 0$. При этом в основу суждений по системным процессам были положены следующие оценки:

- C_2^0 – апостериорной информации, полученной в результате анализа расхода топлива в процессе дискретной работы ГД при управлении движением КА около центра масс, в различных кластерных объединениях с процессами, связанными с работой ЭН КА;

- C_3^0 – информации об определенных значениях управляющих моментов от СБ, используемых для управления движением около центра масс КА, с выбранным критерием оценки применяемых методов, по эквивалентным затратам топлива в РД на выполнение тех же динамических операций;

- C_4^0 – влияния на среднее значение удельного импульса тяги ТМ на маневре изменений разрядного напряжения и тока («бросков разрядного тока»), по сравнению с протеканием процессов при номинальных значениях тока и напряжения разряда; повышение разрядного напряжения при номинальном значении тока приводит к увеличению среднего значения удельного импульса тяги, а «броски разрядного тока» – к его уменьшению;

- C_5^0 – апостериорной информации, полученной в результате анализа расхода топлива при дискретной работе ГД при управлении движением центра масс КА, в различных кластерных объединениях с процессами, связанными с работой ЭН КА;

- C_6^0 – использования режима работы СБ по перемещению центра масс КА для уменьшения расхода топлива на выполнение ПП на фиксированном интервале;

- C_7^0 – массы расходуемого топлива из контролируемых объемов на заданном интервале работы ТМ, определяемой различными

методами по текущему массовому расходу топлива, зависящему от регулировочных характеристик СПД;

- C_8^0 – различных методов точности определения текущего массового расхода топлива из контролируемых объемов ОДУ при работе ГД;
- C_9^0 – различных методов точности определения текущего массового расхода топлива из контролируемых объемов ОДУ при его хранении.

Суждения координатора, занимающегося управлением полетом КА, базировались на результатах прогноза протекания процессов. Проверка суждений производилась по итогам выполнения ПП на определенном интервале. Итоги являлись той «обратной связью» в системе управления сложным процессом, которая позволяла проводить дальнейшее уточнение суждений [1, 2].

Синтез процессов при управлении полетом космических аппаратов

Для обеспечения непрерывного и круглосуточного выполнения функции космического ретранслятора работающими стволами бортового радиотехнического комплекса осуществлялось непрерывное управление процессами движения относительно центра масс КА «Ямал» и движения центра масс КА «Ямал». Оценка эффективности управления расходом топлива РД на фиксированном интервале осуществлялась с использованием МАИ по векторам приоритетов матриц суждений иерархической структуры (рис. 1–3). На основании принятых суждений была разработана оптимальная циклограмма управления расходом топлива при непрерывном регулировании указанных процессов движения.

A^0	B_1^0	B_2^0	B_3^0	ВП
B_1^0	1	8	9	0,06
B_2^0	1/8	1	9/8	0,44
B_3^0	1/9	8/9	1	0,50

Рис. 1. Матрица суждений для процесса первого уровня стратификации С1

B_1^0	C_1^0	$\bigcup_{j=1,2} C_j^0$	$\bigcup_{j=1,3} C_j^0$	ВП	B_2^0	C_4^0	$\bigcup_{j=4,5} C_j^0$	$\bigcup_{j=4,6} C_j^0$	ВП	B_3^0	C_7^0	C_8^0	C_9^0	ВП
C_1^0	1	1/2,1	1/0,6	0,32	C_4^0	1	1/7	1/0,9	0,40	C_7^0	1	1/8	1/12	0,83
$\bigcup_{j=1,2} C_j^0$	2,1	1	2,1/0,6	0,15	$\bigcup_{j=4,5} C_j^0$	7	1	7/0,9	0,16	C_8^0	8	1	8/12	0,10
$\bigcup_{j=1,3} C_j^0$	0,6	0,6/2,1	1	0,53	$\bigcup_{j=4,6} C_j^0$	0,9	0,9/7	1	0,44	C_9^0	12	12/8	1	0,07

Рис. 2. Матрицы суждений для процессов второго уровня стратификации С2

Единым показателем для оценки применяемых методов была минимизация расхода топлива на выполнение ПП. При этом поиск наименьшего из возможных значений расхода топлива осуществлялся по приоритетным коэффициентам, соответствующим цели. Исходными данными для выполнения маневров КА «Ямал» были величины характеристической скорости по бинормали и трансверсали на фиксированном интервале времени. По бинормали коррекция орбиты КА могла быть осуществлена только с использованием РД. В матрице приоритетов B_2^0 для коррекции орбиты выбран процесс C_4^0 (работа системы ТМ), приоритетный коэффициент которого $K_{C_4^0} = 0,4$ максимален для проанализированных системных процессов.

Далее выбирались для коррекции ТМ, имевшие максимальное среднее значение удельного импульса тяги СПД. Из матрицы приоритетов C_4^0 следует, что это ТМ, в которых СПД имеют наилучшие характеристики в элементном процессе D_{10}^0 по «разрядному току и напряжению» при условии отсутствия бросков «разрядного тока», $K_{D_{10}^0} = 0,37$. В общем

распределении топлива на борту для процесса B_2^0 коэффициент приоритета $K_{B_2^0} = 0,44$.

Тогда, согласно МАИ, обобщенный весовой

коэффициент $K_{B_2^0}^{\sum 1}$ оценки реализации выбран-

ных процессов при движении центра масс КА по бинормали в контексте управления расходом топлива КА в целом имеет значение

$$K_{B_2^0}^{\sum 1} = K_{B_2^0} K_{C_4^0} K_{D_{10}^0} \approx 6,5 \cdot 10^{-2},$$

которое является приоритетным, так как оценка проводилась по максимальным значениям сопоставляющих приоритетных коэффициентов ВП.

По трансверсали процесс движения центра масс регулировался кластером системных процессов $\bigcup_{j=4,6} C_j^0$. При выборе для регулирования

процессов «ТМ + СОСБ» коэффициент оценки кластера $K_{\bigcup_{j=4,6} C_j^0} = 0,23$ (см. табл. 9).

C_1^0	D_1^0	D_2^0	D_3^0	ВП	C_2^0	D_4^0	D_5^0	D_6^0	ВП	C_3^0	D_7^0	D_8^0	D_9^0	ВП
D_1^0	1	2,2	1,5	0,21	D_4^0	1	1/1,1	1/1,3	0,37	D_7^0	1	1/1,5	1/6	0,6
D_2^0	1/2,2	1	1,5/2,2	0,47	D_5^0	1,1	1	1,1/1,3	0,34	D_8^0	1,5	1	1,5/6	0,31
D_3^0	1/1,5	2,2/1,5	1	0,32	D_6^0	1,3	1,3/1,1	1	0,29	D_9^0	6	6/1,5	1	0,09
C_4^0	D_{10}^0	D_{11}^0	D_{12}^0	ВП	C_5^0	D_{13}^0	D_{14}^0	D_{15}^0	ВП	C_6^0	D_{16}^0	D_{17}^0	D_{18}^0	ВП
D_{10}^0	1	1/1,1	1/1,2	0,37	D_{13}^0	1	1/1,3	1/1,4	0,40	D_{16}^0	1	1/1,1	1/1,1	0,36
D_{11}^0	1,1	1	1,1/1,2	0,33	D_{14}^0	1,3	1	1,3/1,4	0,31	D_{17}^0	1,1	1	1	0,32
D_{12}^0	1,2	1,2/1,1	1	0,30	D_{15}^0	1,4	1,4/1,3	1	0,29	D_{18}^0	1,1	1	1	0,32
C_7^0	D_{19}^0	D_{20}^0	D_{21}^0	ВП	C_8^0	D_{22}^0	D_{23}^0	D_{24}^0	ВП	C_9^0	D_{25}^0	D_{26}^0	D_{27}^0	ВП
D_{19}^0	1	1/1,2	1/1,2	0,38	D_{22}^0	1	1/1,2	1/1,3	0,38	D_{25}^0	1	1/1,2	1/1,5	0,40
D_{20}^0	1,2	1	1	0,31	D_{23}^0	1,2	1	1,2/1,3	0,32	D_{26}^0	1,2	1	1,2/1,5	0,33
D_{21}^0	1,2	1	1	0,31	D_{24}^0	1,3	1,3/1,2	1	0,30	D_{27}^0	1,5	1,5/1,2	1	0,27

Рис. 3. Матрицы суждений для процессов третьего уровня стратификации СЗ

Далее были определены приоритетные коэффициенты для ТМ и СОСБ, $K_{D_{10}^0} = 0,37$ и $K_{D_{16}^0} = 0,36$ соответственно. Тогда по МАИ обобщенный весовой коэффициент $K_{B_2}^{\Sigma_2}$ оценки реализации выбранных процессов движения центра масс КА по трансверсали в контексте управления расходом топлива КА имеет значение

$$K_{B_2}^{\Sigma_2} = K_{B_2} K_{\bigcup_{j=4,6} C_j^0} (K_{D_{10}^0} + K_{D_{16}^0}) \approx 16,8 \cdot 10^{-2}.$$

Согласно аналогичным рассуждениям был получен обобщенный весовой коэффициент $K_{B_1}^{\Sigma_3}$ оценки реализации движения относительно центра масс КА в контексте управления расходом топлива в целом

$$K_{B_1}^{\Sigma_3} = K_{B_1} K_{\bigcup_{j=1,3} C_j^0} (K_{D_2^0} + K_{D_{16}^0}) \approx 1,6 \cdot 10^{-2},$$

где $K_{B_1}^0 = 0,06$; $K_{\bigcup_{j=1,3} C_j^0} = 0,33$ (см. табл. 5); $K_{D_2^0} = 0,47$.

Для процесса подачи топлива максимален весовой коэффициент $K_{B_3}^{\Sigma_4}$ оценки герметичности при работе ТМ

$$K_{B_3}^{\Sigma_4} = K_{B_3} K_{C_7^0} K_{D_{19}^0} \approx 15,8 \cdot 10^{-2},$$

где $K_{B_3}^0 = 0,50$; $K_{C_7^0} = 0,83$; $K_{D_{19}^0} = 0,38$.

Для процесса хранения топлива между включениями ТМ максимальный весовой коэффициент $K_{B_3}^{\Sigma_5}$ оценки герметичности

$$K_{B_3}^{\Sigma_5} = K_{B_3} K_{C_9^0} K_{D_{25}^0} \approx 1,4 \cdot 10^{-2},$$

где $K_{B_3}^0 = 0,50$; $K_{C_9^0} = 0,07$; $K_{D_{25}^0} = 0,40$.

Исходя из вышеизложенного был получен оптимальный вектор относительной оценки процессов управления расходом топлива РД КА

на фиксированном отрезке $[t_0, t_k]$: $K_B^{\Sigma} = \{K_{B_2}^{\Sigma_1}; K_{B_2}^{\Sigma_2}; K_{B_1}^{\Sigma_3}; K_{B_3}^{\Sigma_4}; K_{B_3}^{\Sigma_5}\} = \{6,5; 16,8; 1,6; 15,8; 1,4\} \cdot 10^{-2}$.

Оптимальному вектору соответствовало наименьшее из возможных значений среднего суточного расхода топлива на отрезке $[t_0, t_k]$,

$G_{[t_0, t_k]}^{\Sigma}$ (кг/сут).

Выводы

В процессе управления полетом КА «Ямал» разработана новая методология варибельного управления расходом топлива, включающая стратификацию сложного процесса управления, его анализ и последующий синтез про-

цессов на уровне отдельных страт, обеспечивающий оптимальное расходование топлива реактивных двигателей. Методология учитывает опосредованное влияние всех происходящих на борту КА процессов на эффективность расхода топлива, а не только тех, что связаны с работой реактивных двигателей. В рамках методологии применялся матричный метод анализа иерархий, позволяющий проводить поиск оптимальных решений по расходу топлива на выполнение программы полета. Для примера рассматривался полет геостационарных КА «Ямал», при этом в методе использовался универсальный подход, который может также применяться для КА других классов и назначений.

Список литературы

1. Ковтун В.С. Методология вариационно-управления расходом топлива реактивных двигателей космических аппаратов // Известия РАН. Энергетика. 2012. № 2. С. 31–42.
2. Ковтун В.С. Стратификация сложного процесса управления полетом космического аппарата // Космонавтика и ракетостроение. 2012. № 4. С. 60–68.
3. Патент RU 2196710 С2. МКИ В 64 G 1/28, 1/44. Российская Федерация. Способ формирования управляющих моментов на космический аппарат с силовыми гироскопами и поворотными солнечными батареями и система для его осуществления. Богачев А.В., Ковтун В.С., Платонов В.Н.; заявитель и патентообладатель – ОАО РКК «Энергия»; заявка 200110540/28 от 28.02.2001; приоритет от 28.02.2001 // Изобретения. 2003. № 2.
4. Патент RU 2197412 С1. МКИ В 64 G 1/28, 1/26. Российская Федерация. Способ управления космическим аппаратом с помощью силовых гироскопов и реактивных двигателей, расположенных под углом к осям связанного базиса. Ковтун В.С., Банит Ю.Р.; заявитель и патентообладатель – ОАО РКК «Энергия»; заявка 200111189/28 от 23.04.2001; приоритет от 23.04.2001 // Изобретения. 2003. № 3.
5. Патент RU 2207969 С2. МКИ В 64 G 1/28, 1/44. Российская Федерация. Способ формирования управляющих воздействий на космический аппарат с силовыми гироскопами и поворотными солнечными батареями. Богачев А.В., Земсков Е.Ф., Ковтун В.С. и др.; заявитель и патентообладатель – ОАО РКК «Энергия»; заявка 2001112734/28 от 08.05.2001; приоритет от 08.05.2001 // Изобретения. 2003. № 19.
6. Калинин Д.А., Ковтун В.С. Определение герметичности системы хранения и подачи газообразного рабочего тела ракетных двигателей в процессе эксплуатации КА // Известия РАН. Энергетика. 2007. № 3. С. 132–141.
7. Патент RU 2392589 С2 МПК G01F 9/00, F02K 9/56, F03H 1/00. Российская Федерация. Способ определения расхода системы подачи рабочего тела к источнику плазмы. Ковтун В.С., Пищулин В.А., Ковтун Т.А.; заявитель и патентообладатель – ОАО РКК «Энергия»; заявка 2008121824/28 от 02.06.2008; приоритет от 02.06.2008 // Изобретения. 2010. № 17.
8. Патент RU 2341417 С2. МПК В64 G 1/00. Российская Федерация. Способ терморегулирования элементов конструкции космического аппарата с расположенными на них элементами конструкции двигательной установки с газовыми ракетными двигателями. Калинин Д.А., Ковтун В.С., Сысоев Д.Н.; заявитель и патентообладатель – ОАО РКК «Энергия»; заявка 2006114269/11 от 26.04.2006; приоритет от 26.04.2006 // Изобретения. 2008. № 35.
9. Ковтун В.С., Севастьянов Д.Н., Пищулин В.А., Фомин Л.В., Бедин Б.И. Определение расхода ксенона в электроракетных плазменных двигателях при эксплуатации космического аппарата «Ямал» // Известия РАН. Энергетика. 2009. № 1. С. 59–66.
10. Патент RU 2272265 С2. МПК7 G 01 M 3/00. Российская Федерация. Способ определения герметичности изолированного объема системы подачи рабочего тела с источником плазмы, преимущественно в условиях вакуума. Калинин Д.А., Ковтун В.С., Сысоев Д.В.; заявитель и патентообладатель – ОАО РКК «Энергия»; заявка 2004114599/28 от 13.05.2004; приоритет от 13.05.2004 // Изобретения. 2006. № 8.
11. Тайорский Г.И., Мурашко В.М., Борисенко А.А. и др. Анализ работы электроракетных двигателей в составе телекоммуникационного космического аппарата «Ямал-200» // Известия РАН. Энергетика. 2009. № 3. С. 124–130.
12. Патент RU 2176972 С1. МКИ В 64 G 1/24. Российская Федерация. Способ определения магнитного момента солнечных батарей космического аппарата с системой силовых гироскопов. Ковтун В.С., Банит Ю.Р.; заявитель и патентообладатель – ОАО РКК «Энергия»; заявка 2000130187/28 от 05.12.2000; приоритет от 05.12.2000 // Изобретения. 2001. № 35.
13. Патент RU 2377522 С1. МПК G01 3/00. Способ определения герметичности системы подачи рабочего тела к источнику плазмы, преимущественно в условиях вакуума. Ковтун В.С., Бедин Б.И., Фомин Л.В., Калинин Д.А.; заявитель и патентообладатель – ОАО РКК «Энергия»; заявка 2008121823/28 от 02.06.2008; приоритет от 02.06.2008 // Изобретения. 2009. № 36.

Статья поступила в редакцию 11.01.2013 г.