

(проект 1.4.1–1), Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 12-07-00302, 13-07-00279, 13-08-00702, 13-08-01250, 13-07-12120, 13-06-0087), Программы фундаментальных исследований ОНИТ РАН (проект № 2.11), проектов ESTLATRUS 2.1/ELRI-184/2011/14, 1.2/ELRI-121/2011/13.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комбинированные модели управления структурной динамикой сложных технических объектов / Б. В. Москвин, Е. П. Михайлов, А. Н. Павлов, Б. В. Соколов // Изв. вузов. Приборостроение. 2006. Т. 49, № 11. С. 8—12.
2. Павлов А. Н. Комплексное моделирование структурно-функциональной реконфигурации сложных объектов // Тр. СПИИРАН. 2013. Вып. 5. С. 143—168.

#### Сведения об авторах

- Александр Николаевич Павлов** — канд. техн. наук, доцент; СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; E-mail: pavlov62@list.ru
- Дмитрий Александрович Павлов** — адъюнкт; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра автоматизированных систем управления космическими комплексами, Санкт-Петербург; E-mail: dpavlov239@mail.ru
- Борис Владимирович Москвин** — канд. техн. наук, профессор; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра автоматизированных систем управления космическими комплексами, Санкт-Петербург; E-mail: z-moskvin@mail.ru
- Кирилл Леонидович Григорьев** — канд. техн. наук; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра автоматизированных систем управления космическими комплексами, Санкт-Петербург; E-mail: Grigorjev.kir@yandex.ru

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию  
10.06.14 г.

УДК 629.7.06.062

А. Ю. КУЛАКОВ

### МОДЕЛЬ ОЦЕНИВАНИЯ РАСХОДА ТОПЛИВА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С УЧЕТОМ НЕШТАТНЫХ СИТУАЦИЙ

Предложена упрощенная модель процесса функционирования космического аппарата, предназначенная для оценочного расчета его топливного ресурса и срока активного существования. При построении учитывается влияние сбоев (отказов) бортовой аппаратуры системы управления движением на расход топлива как при штатной работе, так и в нештатных ситуациях.

**Ключевые слова:** моделирование сбоев и отказов, топливный ресурс, нештатные ситуации, бортовые системы КА.

Одним из основных показателей функционирования космического аппарата (КА) на рабочей орбите является срок его активного существования, который жестко регламентирует пределы невозобновляемых ресурсов бортовой аппаратуры (БА) и запас топлива в баках двигательной установки (ДУ) КА. При этом запас топлива в баках на фиксированный срок зависит от периодичности включения установки и единичного расхода топлива при различных режимах работы КА. Поэтому для штатной работы номинальное значение топливного ресурса определяется числом режимов функционирования ДУ КА в заданном интервале времени (сутки, месяц, год). К ним относятся режимы коррекций орбиты, которые задаются ис-

ходя из известных параметров орбиты КА, и режимы стабилизации, применяемые для сброса кинетического момента или погашения угловых скоростей КА при отделении его от ракеты-носителя. Однако при летной эксплуатации возможны незапланированные режимы работы двигательной установки, вызванные нештатным функционированием БА, в частности сбоями и отказами приборов системы управления движением.

Сбои и отказы носят вероятностно-периодический характер [1]. Факторы, определяющие нештатную работу приборов системы управления движением, можно разделить на две группы: технологические, связанные с особенностью работы прибора, и физические, связанные с воздействием космической среды на КА. При построении математической модели учет этих факторов посредством уравнений является сложной задачей, а воспроизведение строгой зависимости отказов от данных факторов (в ходе летной эксплуатации КА) практически невозможно. Поэтому для расчета расхода топлива предлагается воспользоваться логико-вероятностными методами учета периодичности сбоев.

При моделировании нештатных ситуаций (НС) для оценивания ресурсов КА возникают трудности, связанные с неопределенностью состояния моделируемого объекта. Моделирование же штатных режимов выполняется при строго заданных условиях эксплуатации. Штатные режимы заранее определяются техническим описанием систем КА, где они уже заложены в логику бортового программного обеспечения (БПО). Для получения временных зависимостей параметров работы двигательной установки в штатных режимах обычно осуществляется аппроксимация результатов типовых расчетов для начального, конечного и промежуточных состояний КА (или используется аналитическая зависимость этих параметров). Ситуации, вызванные сбоями БА, которые не определяются техническим описанием (нештатные ситуации), а являются известными по опыту эксплуатации аналогичных образцов техники, также могут быть промоделированы. При этом условия возникновения и протекания различных режимов могут быть описаны с помощью вероятностных зависимостей, что составляет дополнительную трудность при оценке топливного ресурса, а следовательно, и срока активного существования КА.

Представим модель КА как динамическую систему, характеризуемую базовыми множествами: множеством моментов времени  $T = \{t\}$ , множеством входных ситуаций  $Q = \{q\}$  и множеством состояний системы  $X = \{x\}$ . Множество входных ситуаций характеризуется вектором  $\theta_q = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i, \dots, \theta_n\}$ , где  $\theta_i \in \{0; 1\}$ ,  $n$  — количество диагностируемых бортовых элементов. Множество состояний системы определяется остатками топлива и совокупностью работоспособных приборов.

Пусть множество вариантов работы ДУ КА формализовано как для штатных режимов, так и для нештатных ситуаций. Каждый элемент этого множества определяется двумя параметрами: частотой возникновения  $\omega$  и расходом топлива  $\rho$ . Запишем эти параметры в виде функций:

$$\omega = \begin{cases} \omega(t) & \text{для штатных режимов,} \\ \omega(\theta(t)) & \text{для нештатных ситуаций;} \end{cases}$$

$$\rho = \begin{cases} \rho(M(t)) & \text{для штатных режимов,} \\ \rho(M(t), \theta(t)) & \text{для нештатных ситуаций,} \end{cases}$$

где функция  $M(t)$ , характеризуемая зависимостью массовых и центровочных характеристик от времени, может задаваться линейной или экспоненциальной зависимостью, например при аппроксимации экспериментальных результатов; в нештатных ситуациях на параметры  $\omega$  и  $\rho$  влияют случайные величины — время сбоя бортовых элементов и время их восстановления.

Для имитации сбоев и отказов приборов системы управления движением предлагается использовать наиболее распространенный на практике экспоненциальный закон распределения, который характерен для периода штатной работы системы, исключая наработку и старение БА.

Этот закон задается интенсивностью безотказной работы и наиболее вероятно описывает внезапные сбои. Таким образом, время внезапного отказа вычисляется по формуле [2]

$$t_{\text{отк}} = -\frac{\ln \xi}{\lambda},$$

где  $\lambda$  — интенсивность отказов,  $\xi$  — случайное число с равномерным законом распределения на интервале  $(0, 1]$ .

В качестве исходных данных для определения интенсивности отказов используются статистические данные по эксплуатирующимся аналогичным приборам: если статистические данные отсутствуют, то расчет интенсивности осуществляется на основе зависимости

$$\lambda = -\frac{\ln P(\tau)}{\tau},$$

где  $P(\tau)$  — вероятность безотказной работы в течение временного интервала  $\tau$ .

При имитации сбоев учитывается также время восстановления работоспособности системы:  $T_{\text{в}} = T_{\text{max}} \xi$ , где  $T_{\text{max}}$  — максимальное время восстановления, определяемое особенностью работы бортовой системы. Тогда вектор  $\theta_q(t)$  в каждый момент времени будет задаваться следующим образом:

$$\theta_i(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } t \in (t_{\text{отк}}; t_{\text{отк}} + T_{\text{в}}), \\ 0 & \text{при } t \notin (t_{\text{отк}}; t_{\text{отк}} + T_{\text{в}}). \end{cases}$$

Зависимость работоспособности системы от возникшей НС описывается событиями, инициирующими отказ. Сбои и отказы приборов системы являются такими событиями. Дерево отказов (сбоев) системы управления движением при возникновении нештатных ситуаций, сопровождаемых дополнительным расходом топлива, представлено на рис. 1, где приняты следующие обозначения: СГ — силовой гироскоп, ОУ — оконечное устройство, БУП — блок управления приводом, БПМ — блок питания мотора, ЗД — звездный датчик, ИУС — измеритель угловой скорости; показаны элементарные отказы и составные (выделены фоном).

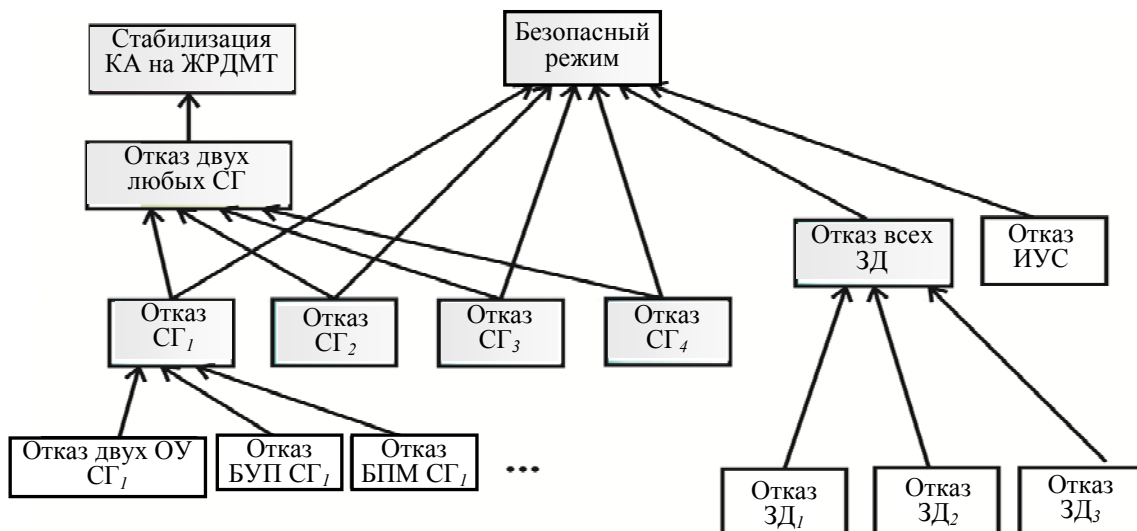


Рис. 1

Для оценочного расчета расхода топлива с учетом нештатных ситуаций воспользуемся аппаратом логико-вероятностного исчисления [3].

Рассмотрим два варианта НС — уход КА в безопасный режим (БР) с последующим выводом с помощью двигательной установки и стабилизацию КА на жидкостных реактивных двигателях малой тяги (ЖРДМТ). Опишем данные режимы с помощью логических функций, построенных в соответствии с рис. 1:

$$f_{CG_i} = F_{CG_i} (\theta_{Oy_1CG_i}, \theta_{Oy_2CG_i}, \theta_{БУП CG_i}, \theta_{БМП CG_i});$$

$$f_{БР} = F_{БР} (f_{CG_1}, f_{CG_2}, f_{CG_3}, f_{CG_4}, \theta_{ЗД_1}, \theta_{ЗД_2}, \theta_{ЗД_3}, \theta_{ИУС});$$

$$f_{ЖРДМТ} = F_{ЖРДМТ} (f_{CG_1}, f_{CG_2}, f_{CG_3}, f_{CG_4}),$$

где  $F_{CG_i}$  — условие сбоя  $i$ -го силового гироскопа,  $F_{БР}$  — условие ухода КА в безопасный режим;  $F_{ЖРДМТ}$  — условие стабилизации КА на ЖРДМТ.

При штатном режиме эксплуатации КА функция  $\omega(t) = f(t)$  задается следующим образом:

$$\omega(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } t > T; \\ 0, & \end{cases}$$

где  $T$  — текущий момент включения двигательной установки, вычисляемый в зависимости от времени предыдущего аналогичного включения.

Тогда в общем виде интенсивность расхода топлива при работе ДУ КА в каждый момент времени определяется формулой

$$y(t) = \sum_{j=1}^m \omega_j(\theta(t)) \cdot \rho_j(M(t), \theta(t)),$$

где  $m$  — общее число возможных вариантов работы установки.

Для определения расхода топлива в различных режимах был использован программный комплекс математического моделирования динамики КА и работы системы управления движением [4]. Были проимитированы варианты работы ДУ КА в штатных режимах и нештатных ситуациях.

В данном комплексе КА рассматривается как материальный объект, имеющий сложную конструкцию с гибкими выносимыми элементами, а моделируемая система управления включает чувствительные элементы и исполнительные органы системы управления движением, а также БПО, определяющее логику функционирования КА. Пространственное движение КА описывается тремя моделями — углового движения, движения центра масс по орбите и колебания гибких элементов конструкции. Учитывается влияние на работу КА внутренних и внешних сил и моментов. Схематичное описание программного комплекса представлено на рис. 2 в виде блочной структуры.



Рис. 2

Результаты проведенных экспериментов при среднем времени между сбоями  $t_{cp} = 20 \dots 40$  суток представлены в таблице, где приведены: масса остатка топлива, приходящегося

на момент фиксированного окончания срока активного существования КА ( $M_1$ ); суммарная масса топлива, необходимого для вывода КА из безопасного режима ( $M_2$ ); масса топлива, необходимого для стабилизации КА на ЖРДМТ ( $M_3$ ), и возможный срок активного существования ( $D$ ), при определении которого учитывается также запас топлива на увод КА с орбиты. Интенсивность сбоев, определяемая как величина, обратная  $t_{cp}$ , рассчитывается для являющихся причинами отказов элементов силового гироскопа и чувствительных элементов.

$\lambda, \text{ч}^{-1}$					$M_1, \text{кг}$	$M_2, \text{кг}$	$M_3, \text{кг}$	$D, \text{лет}$
ОУ	БУП	БПМ	ЗД	ИУС				
0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	324,3	81,5	10,5	7,2
0,002	0,001	0,002	0,002	0,001	279,8	106,5	46,5	6,49
0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	257,5	114,4	63	6

Предложенная модель оценки срока активного существования КА позволяет учитывать внезапно возникающие сбои и отказы бортовой аппаратуры, что обеспечивает приближение оценки расхода основного невозполняемого ресурса (топлива двигательной установки) к более реальному прогнозу. Представленная логико-вероятностная модель может быть расширена и применительно к другим системам, обеспечивающим функционирование КА.

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации: Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (мероприятие 6.1.1), Университета ИТМО (субсидия 074-U01), Программы научно-технического сотрудничества Союзного государства „Мониторинг СГ“ (проект 1.4.1-1), Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 12-07-00302, 13-07-00279, 13-08-00702, 13-08-01250, 13-07-12120, 13-06-0087), Программы фундаментальных исследований ОНИТ РАН (проект № 2.11), проектов ESTLATRUS 2.1/ELRI-184/2011/14, 1.2/ELRI-121/2011/13.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Базовский И. Надежность. Теория и практика. М.: Мир, 1965. 373 с.
2. Лохматкин В. В., Куренко В. И. Прогнозирование производительности съемки КА ДЗЗ с учетом надежности бортовых систем // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2013. Т. 15, № 4 (2).
3. Рябинин И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. СПб: Политехника, 2000. 320 с.
4. Сотников М. В., Копылов В. М., Игнатьев М. Г. Программный комплекс динамического моделирования работы СУД КА „ММДКА“ // Тр. III науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов ФГУП «КБ „Арсенал“». СПб: 2011.

#### Сведения об авторе

**Александр Юрьевич Кулаков** — аспирант; СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; E-mail: russ69@bk.ru

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию  
10.06.14 г.