

УДК 519.8

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПУТЕЙ ПРОДЛЕНИЯ СРОКОВ АКТИВНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В УСЛОВИЯХ ДЕСТРУКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОСНОВЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО АНАЛИТИКО-ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Павлов А.Н., Алёшин Е.Н., Воротягин В.Н. (Санкт-Петербург),  
Серегин Г.Г. (Москва)

### Введение

Одной из актуальных проблем, возникающих в ходе создания и эксплуатации сложных динамических технических систем, является продление сроков их активного функционирования. Моделирование функционирования систем данного класса осуществляется на основе концепции активного подвижного объекта (АПО), рассматривающей аспекты информационного, энергетического или вещественного взаимодействия объекта с окружающей физической средой или другими подобными объектами. Одним из характерных примеров систем, описываемых концепцией АПО, являются космические аппараты. Запуск, выведение на орбиту и сам орбитальный полет любого АПО всегда связан с определенными рисками. Проблема снижения данного вида рисков стоит перед конструкторами ракетно-космической промышленности с самого начала космической эры. Причиной этому является ряд факторов – таких как стремление обезопасить жизни и здоровье членов экипажа, большие финансовые затраты на составные части АПО и запуск его на орбиту, отсутствие возможности проведения ремонтных работ непилотируемых АПО в орбитальном полете.

На данный момент разработано множество подходов и методов к повышению надежности ракет космического назначения и АПО, однако постоянное развитие космических средств заставляет конструкторов вновь разрабатывать подходящую методологию к работе с конкретными образцами космической техники. Это связано с тем, что с развитием технологий интенсивно растет функциональная и аппаратная сложность их устройства. За последние 35 лет зафиксирован более чем 10-кратный рост сложности электронных систем АПО. В связи с этим увеличение срока активного существования космической техники и требования к надежности элементной базы являются весьма актуальными вопросами [1].

Для максимально эффективного решения данной проблемы необходимо разработать единую методологию управления процессом создания АПО, которая позволила бы минимизировать риски, связанные с техническими неисправностями, возникающими в ходе его эксплуатации, и приводящие к отказам. Данная система управления должна анализировать все технологические процессы создания АПО с момента его проектирования и до ввода в эксплуатацию. На основе результатов анализа технологических процессов система управления должна представить предложения по оптимизации работы и пути решения проблемных вопросов.

Одной из задач такой системы управления является синтез рациональных вариантов конфигурации бортовых систем АПО с целью повышения их живучести на этапах вывода АПО на орбиту и в самом орбитальном полете. Под *живучестью* понимается способность системы выполнять установленный минимальный объем своих функций при внешних воздействиях, не предусмотренных условиями нормальной эксплуатации, противостоять таким воздействиям, осуществлять выбор

оптимального режима функционирования, перестройки структуры, изменения функций отдельных подсистем и их поведения [2]. Для решения задачи оценивания живучести проектируемой системы управления движением (СУД) с учетом непредсказуемости, непрогнозируемости воздействий факторов космического пространства следует определить показатель структурно-функциональной живучести. В качестве *показателя структурно-функциональной живучести СУД АПО* в данной работе будем понимать вероятность того, что функциональная структура СУД сохранит работоспособность при деструктивных воздействиях внешней среды.

Таким образом, возникает проблема разработки и анализа методологии многокритериального конфигурирования бортовых систем (БС) АПО и выбора из полученного множества конфигураций оптимального варианта. В настоящее время с целью повышения живучести АПО поиск оптимального варианта его БС происходит за счет апостериорной реконструкции их компоновки, оперативного внедрения новых решений и проверки их в условиях космического пространства [3]. Однако такой подход создает излишние траты финансов и времени. Кроме того, он требует применения наиболее совершенной методики синтеза программ диагностирования автономных АПО. Также наиболее распространенными методами повышения живучести являются методы, связанные с использованием различных форм избыточности, т.е. с включением некоторых дополнительных средств, избыточных по отношению к минимально-необходимому составу и количеству, которые требуются для обеспечения нормального функционирования объекта.

Несмотря на многообразие разработанных и применяемых способов и методов резервирования, проблема создания и совершенствования эффективных методов рационального использования избыточности остается актуальной [4]. Дело в том, что с каждым отказом происходит снижение структурной, временной и других видов избыточности и, как следствие, готовности АПО к дальнейшему выполнению целевых функций. Для действенного решения данной проблемы необходима разработка программного обеспечения, способного составлять прогноз технического состояния АПО в условиях деструктивного воздействия космического пространства с применением методов комплексного (гибридного) математического моделирования.

### **Комплексное моделирование вариантов БС АПО на примере малого космического аппарата**

В ходе проведения анализа существующих методов математического моделирования и расчета показателей живучести, надежности и безопасности структурно-сложных систем [5, 6] выяснилось, что на данный момент существует множество подходов для решения описанной проблемы с использованием моделей и методов логико-вероятностного исчисления, марковского моделирования, деревьев отказов, деревьев событий, теории графов и других.

Несмотря на широкий спектр подходов к оценке живучести сложных систем и разработанного на их основе программного обеспечения, актуальной продолжает оставаться задача многокритериального проектирования структуры и параметров СУД малого космического аппарата (МКА), а также оптимизации его ограниченных ресурсов для обеспечения упреждающей компенсации деструктивных воздействий внешней среды.

В связи с тем, что основную часть времени своего активного существования МКА находится в космическом пространстве, деструктивное влияние на правильность и безотказность функционирования БС МКА в большей мере оказывает космическая среда. Известно, что более половины сбоев и отказов функциональных элементов (ФЭ) бортовой аппаратуры (БА) МКА происходят по причине неблагоприятных воздействий

на них факторов космического пространства [7]. Вместе с тем важнейшую роль в обеспечении длительной безотказной работы МКА играет стойкость их конструкционных материалов и элементов бортового оборудования к воздействию агрессивной окружающей космической среды. В космическом пространстве деструктивные воздействия можно поделить на 2 вида: целенаправленные и индифферентные воздействия.

На основании вышеизложенного возникает задача продления сроков активного функционирования МКА за счет конфигурирования вариантов БС МКА (на примере СУД) с проактивной компенсацией деструктивных возмущений среды в условиях ограниченных бортовых ресурсов, которая сводится к следующему:

- **известно:** номенклатурная база ФЭ (чувствительных элементов (ЧЭ) и исполнительных органов (ИО)) СУД МКА, возможности структурного резервирования БА СУД МКА, режимы ориентации, а также ограничения на расход бортовых ресурсов МКА;

- **требуется найти:** такие эталонные эффективные варианты структурно-параметрической конфигурации СУД МКА, которые при выполнении ресурсных ограничений обеспечивают заданные (либо оптимальные) уровни значений структурно-функциональной живучести, а также комплексных показателей надежности функционирования МКА.

Рассмотрим некоторый вариант реализации СУД МКА. Каждый ФЭ БС, используемый в рассматриваемой реализации, характеризуется вероятностью безотказной работы (ВБР)  $p_i, i \in N$ . Одним из естественных методов статистического моделирования для оценки показателя структурно-функциональной живучести СУД МКА является имитация случайных отказов ФЭ варианта конфигурации системы и проверка работоспособности полученных состояний СУД. Практичность и целесообразность применения метода статистических испытаний (метода Монте-Карло) заключается в возможности учета условий существенной неопределенности и высокого риска, успешном сочетании с другими вычислительными методами и дополнении их [8-10]. Поэтому преимущество применения предложенного метода статистического моделирования заключается в учете условий неизвестного влияния ФКП пространства на ФЭ МКА и в возможности анализировать и оценивать различные сценарии реализации проекта и учитывать разные факторы риска в рамках единого подхода.

Схема алгоритма указанной процедуры заключается в следующем.

1. Для каждого  $i$ -го ФЭ генерируется случайное число по равномерному закону распределения  $\xi_i$  из интервала  $[0,1]$ .

2. Данные числа  $\{\xi_i, i \in N\}$  сравниваются с известными для рассматриваемого варианта СУД ВБР  $\{p_i, i \in N\}$  соответствующих ФЭ.

3. Если  $\xi_i \leq p_i$ , то  $\tilde{p}_i = 1$  ( $i$ -й ФЭ работоспособен), в противном случае  $\tilde{p}_i = 0$  ( $i$ -й ФЭ отказал).

4. После построения случайной реализации состояния всех ФЭ определяется работоспособность СУД. Если показатель структурно-функциональной надежности при выполнении заданных режимов ориентации (режимов функционирования СУД МКА)  $F$  равен 1 (т.е.  $P_F(\{\tilde{p}_i, \tilde{q}_i = 1 - \tilde{p}_i\}, i \in N) = 1$ ), то СУД работоспособна. И в счетчик числа успешных испытаний добавляется единица. Другими словами, реализуется схема испытаний Бернулли.

5. Шаги 1-4 процедуры повторяются заданное число испытаний. Полученное значение в счетчике числа успешных испытаний делится на общее число проведенных испытаний, в результате получается значение показателя живучести данного варианта конфигурации СУД МКА.

Для поиска обоснованных и достоверных вариантов проектируемых СУД МКА уместно применить в рамках предлагаемой имитационной системы аналитическую модель формирования эффективных (паретовских) вариантов конфигураций СУД МКА. Совместное использование таких разнотипных моделей, методов и алгоритмов позволит взаимно компенсировать их объективно существующие недостатки и ограничения, одновременно усилить их положительные качества. Так, для решения задачи синтеза вариантов БС МКА воспользуемся аналитической многокритериальной моделью [11, 12]:  $\min_{X \in \Delta} C(X), \min_{X \in \Delta} V(X), \max_{X \in \Delta} P(X)$ . Множество допустимых

альтернатив  $\Delta$  формируется с учетом ограничений, связанных с узкой и широкой номенклатурой используемых комплектующих изделий.

Тогда целевые функции можно представить следующим образом: показатель энергопотребления БС МКА –  $C(X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} c_{ij} \cdot x_{ij}$ , масса–габаритный показатель БС

МКА –  $V(X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \vartheta_{ij} \cdot x_{ij}$ , показатель структурно-функциональной надежности БС

МКА –  $P(X) = P_F \left( \sum_{j=1}^{m_1} p_{1j} \cdot x_{1j}, \sum_{j=1}^{m_2} p_{2j} \cdot x_{2j}, \dots, \sum_{j=1}^{m_n} p_{nj} \cdot x_{nj} \right)$ .

Другими словами, следует найти эффективные (паретовские) варианты проекта БС МКА  $\Delta^{nd} \subseteq \Delta$ , обеспечивающие минимальное энергопотребление СУД МКА, минимальную массу СУД МКА и максимальную структурно-функциональную надежность реализации режимов ориентации СУД МКА.

### **Пример практической реализации комплексного моделирования рациональных вариантов конфигурации БС МКА**

Особенности аналитической модели многокритериального выбора эффективных вариантов проекта БС МКА связаны с тем, что множество допустимых альтернатив дискретно, целевая функция  $P(X)$  нелинейная и присутствует критериальная неопределенность. Для преодоления критериальной неопределенности в работе [6, 11] было обосновано применение метода последовательных уступок (лексикографического интервального результирующего отношения предпочтения), позволяющего осуществить последовательное сужение множества альтернатив для построения эффективных вариантов проекта.

Для нахождения рациональных вариантов реализации БС МКА воспользуемся исходными данными для СУД МКА «Аист-2д» [12], представленными в работе [11]. Для выполнения режимов «точной», «грубой» ориентации и «ориентации на Солнце» используются различные ЧЭ и ИО, включающие отдельные измерители угловой скорости (ОИУС), управляющие двигатели маховики (УДМ), систему спутниковой навигации (ССН), приборы ориентации по Земле (ПОЗ), оптические звездные датчики (ОЗД), магнитометры (МА), электромагниты (ЭМ).

Результаты применения аналитической модели и алгоритма многокритериального синтеза вариантов СУД МКА при реализации всех режимов ориентации приведены в таблице 1.

Таблица 1. Эффективные (претовские) варианты СУД МКА

Вариант	ОИУС 1	ОИУС 2	ОИУС 3	ОИУС 4	УДМ 1	УДМ 2	УДМ 3	УДМ 4	ССН	ОЗД 1	ОЗД 2	ПОЗ 1	ПОЗ 2	МА 1	МА 2	ЭМ 1	ЭМ 2	ЭМ 3	Масса	Энергопотребление	Надежность
1	7	7	7	6	4	4	4	4	-	-	-	1	-	5	5	2	2	2	16,38	83,5	0,643
2	2	2	6	2	4	4	4	4	-	-	-	-	3	5	3	2	2	2	8,18	104,0	0,698
3	2	7	6	5	4	4	4	4	-	-	-	3	4	4	3	2	2	2	12,20	104,5	0,769
4	2	2	2	2	4	4	4	4	-	-	-	3	3	4	4	3	2	2	8,21	125,0	0,820
5	7	7	7	7	4	4	4	4	-	-	-	3	3	3	3	2	2	5	16,42	104,0	0,827
6	7	7	7	7	4	4	4	4	-	-	-	1	3	6	6	2	5	3	20,45	104,0	0,866
7	7	7	7	7	4	4	4	4	-	-	-	1	1	6	6	3	3	3	21,87	103,0	0,885
8	7	2	2	2	4	4	4	4	-	-	-	4	4	3	6	3	3	3	11,91	124,5	0,895
9	2	2	2	2	4	4	4	4	-	-	-	3	3	4	3	5	5	5	8,20	137,5	0,917
10	4	4	4	2	6	6	6	4	-	-	-	3	4	4	6	3	5	5	12,17	146,4	0,928
11	7	7	4	7	4	4	4	4	-	-	-	3	4	4	6	5	5	5	16,32	124,0	0,928
12	4	4	4	4	4	6	6	6	-	-	-	3	3	4	4	5	5	5	12,36	160,4	0,938
13	7	7	7	7	6	6	6	6	-	-	-	4	4	4	6	5	5	5	20,42	124,2	0,938
14	7	7	7	7	7	6	6	6	1	-	-	4	6	7	7	5	5	5	28,78	145,4	0,944
15	4	4	4	4	6	6	6	6	1	-	7	3	3	4	4	5	5	5	16,23	177,2	0,945
16	4	7	7	2	4	4	4	4	1	-	-	3	4	4	4	5	5	5	16,42	146,0	0,956
17	4	7	7	4	7	7	7	7	1	7	7	6	4	7	7	5	5	5	32,52	188,0	0,956
18	4	4	4	4	7	7	7	7	1	5	7	4	4	7	7	5	5	5	28,74	206,0	0,958
19	4	4	4	4	7	7	7	7	7	7	7	6	6	7	7	5	5	5	32,60	209,0	0,960
20	4	4	4	4	7	7	7	7	1	5	5	3	5	7	4	5	5	5	28,74	216,5	0,960
21	4	4	4	4	7	7	7	7	1	5	5	5	5	7	7	5	5	5	32,78	223,0	0,961

Используя дополнительную информацию от ЛПР, которая, например, состоит в том, что надежность реализации режимов ориентации должна быть не ниже 0.94, показатель энергопотребления изделия не является критичным, масса СУД не должна превышать 20.0 условных единиц, ему будут предложены для дальнейшего анализа только 2 варианта из таблицы 1 – варианты № 15 и 16. Применяв имитационную модель, осуществим вычисление показателей структурно-функциональной живучести этих вариантов для различных режимов ориентации, результаты расчета представлены в таблице 2.

Заметно, что структурно-функциональная живучесть варианта № 15 по сравнению с вариантом № 16 лучше для исследуемых режимов ориентации, следовательно, для конфигурации варианта СУД БС МКА целесообразно выбрать данный вариант реализации.

Таблица 2. Значения показателя структурно-функциональной живучести предложенных вариантов

Номер варианта	Режим «точной» ориентации	Режим «грубой» ориентации	Режим «ориентации на Солнце»
15	0,955	0,956	0,959
16	0,948	0,93	0,948

### Заключение

Для ситуаций, когда не известны масштабы и предполагаемые моменты наступления неблагоприятных воздействий, предложенный методический подход позволяет провести исследования структурно-функциональной живучести и критичности отказов ФЭ СУД МКА, определить роль каждого ФЭ и подсистем СУД МКА в реализации различных режимов функционирования МКА. В основе предлагаемого подхода используется метод статистических испытаний (метод Монте-Карло). Для оценивания и анализа структурно-функциональной живучести и выбора вариантов бортовой системы малого космического аппарата с учетом деструктивных воздействий была разработана аналитико-имитационная модель. Предложенные показатели структурно-технологической живучести БС МКА в случае расчетных, а, особенно, нерасчетных аварийных полетных ситуациях на борту МКА позволяют проанализировать и оценить живучесть той или иной конфигурации БС МКА.

Повышение степени обоснованности проектных решений по обеспечению живучести функционирования СУДН МКА в условиях деструктивных воздействий является одним из перспективных направлений в области космического приборостроения. Используя комплексный (аналитико-имитационный) подход к моделированию многокритериального синтеза вариантов БС МКА, ЛПР существенно сможет снизить количество ошибок при проектировании и тем самым обоснованно выбирать вариант реализации компоновки сложного объекта еще на этапе его создания.

### Литература

1. **Севастьянов Н.Н., Андреев А.И.** Основы управления надежностью космических аппаратов с длительными сроками эксплуатации / Н.Н. Севастьянов. – Томск: Издательский Дом ТГУ, 2015. – 266 с.
2. **Гансвинд И.Н.** Малые космические аппараты в дистанционном зондировании земли / И.Н. Гансвинд // Исследование земли из космоса. – 2019. – № 5. – С. 82–88.
3. Викторова В.С. Агрегирование моделей анализа надежности и безопасности технических систем сложной структуры: дис. ... докт. тех. наук: 05.13.01 / Валентина Сергеевна Викторова. – Москва, 2009. – 223 л.
4. **Manorma Kumar Risk Spectrum: emerging software for nuclear power industry.** – Jordan, 2010.
5. Военная системотехника и системный анализ. Модели и методы принятия решений в сложных организационно-технических комплексах в условиях неопределённости и многокритериальности: учебник / Б.В. Соколов, Б.В. Москвин, А. Н. Павлов [и др.] – СПб.: ВИККУ имени А.Ф. Можайского, 1999. – 496 с.
6. Космическое пространство и его влияние на элементы конструкций космических аппаратов [Электронный ресурс]: электрон. метод. пособие к практ. работам / М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т); авт.-сост.: Н.Д. Семкин, А.М. Телегин, М.П. Калаев. – Электрон. текстовые и граф. дан. (1,06 Мбайт). – Самара, 2013. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).
7. **Павлов А.Н., Воротягин В.Н., Павлов Д.А., Кулаков А.Ю.** Алгоритм проектирования надежности системы управления движением малого космического

аппарата // Моделирование и Анализ Безопасности и Риска в Сложных Системах: международная конференция МАБР-2020 (Санкт-Петербург, 23-25 июня, 2020 г.): сб. статей / под ред. Е.Д. Соложенцева, В.В. Карасева. – СПб.: ГУАП, 2020. – С. 115-121.

8. **Павлов А.Н.** Исследование структурно-функциональной надёжности малых космических аппаратов при решении задач ориентации / А.Н. Павлов, А.Ю. Кулаков, В.Н. Воротягин, А.Б. Умаров // Информатизация и связь. – 2020. – Вып. № 4. – С. 156-164.

9. **Павлов А.Н.** Методика оценивания структурно-функциональной живучести бортовых систем МКА в условиях возникновения нерасчетных полетных ситуаций / Д.А. Павлов, А.Н. Павлов, А.А. Слинко, В.Н. Воротягин // Информация и космос. – 2019. – Вып. № 3. – С. 139-147.

10. **Павлов А.Н.** Исследование структурно-функциональной живучести малых космических аппаратов / А.Н. Павлов, Д.А. Павлов, В.Н. Воротягин, А.Б. Умаров, А.Ю. Кулаков // Региональная информатика и информационная безопасность. Сборник трудов. Выпуск 8 / СПОИСУ. – СПб., 2020. – С.43-49. ISBN 978-5-907223-87-5.

11. **Pavlov A.N., Vorotyagin V.N., Pavlov D.A., Zakharov V.V.** Methodology Of Structural-Functional Synthesis Of The Small Spacecraft Onboard System Appearance // Stability and Control Processes – Proceedings of the 4th International Conference Dedicated to the Memory of Professor Vladimir Zubov. Lecture Notes in Control and Information Sciences – Proceedings. – 2020. – С. 153-161.

12. **Кирилин А.Н., Ахметов Р.Н., Шахматов Е.В., Ткаченко С.И., Бакланов А.И., Салмин В.В., Семкин Н.Д., Ткаченко И.С., Горячкин О.В.** Опытнo-технологический малый космический аппарат «АИСТ-2Д». – Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2017. – 324 с.