

Исследование структурно-функциональной надежности системы управления движением и навигации малого космического аппарата в условиях многорежимности ее функционирования

© А.Н. Павлов^{1,2}, Д.А. Павлов¹, А.Ю. Кулаков², А.Б. Умаров¹

¹Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского,
Санкт-Петербург, 197198, Россия

²Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН,
Санкт-Петербург, 199178, Россия

В ходе проектирования, создания и применения сложных многорежимных систем, к которым относится система управления движением малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли, при выборе конфигурации элементов и связей между ними, а также параметров системы целесообразно исследовать возможности задействования динамических режимов функционирования, значительно влияющих на структурно-функциональную надежность системы. Представлена новая оригинальная концепция параметрического генома структуры сложных многорежимных объектов. Исследовано влияние разных вариантов задействования режимов функционирования на структурно-функциональную надежность системы управления движением и навигации малого космического аппарата «Аист-2Д». Введены интегральные показатели, позволяющие оценить структурно-функциональную надежность исследуемой системы с учетом совместного задействования режимов ее функционирования, равноценности значений интенсивности задействования данных режимов и однородности системы управления движением.

Ключевые слова: режимы функционирования системы, рациональное соотношение задействования режимов, структурно-функциональная надежность, совместность задействования режимов, интенсивность задействования режимов

Введение. Одной из важнейших составляющих развития космической отрасли является проектирование, создание и применение малых космических аппаратов (МКА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Как показывает практика, в процессе разработки МКА ДЗЗ большое значение имеет повышение степени обоснованности проектных и оперативных решений по обеспечению требуемого качества функционирования бортового комплекса управления (БКУ) МКА. Основными показателями качества функционирования МКА ДЗЗ можно считать: оперативность; количество используемых спектральных каналов; пространственное разрешение; производительность.

Такие характеристики МКА ДЗЗ, как пространственное разрешение, производительность, возможность проводить съемки разного типа и в разных диапазонах, зависят преимущественно от двух подсистем МКА: от его целевой аппаратуры и системы управления движением и

навигации (СУДН). При этом целевая аппаратура непосредственно формирует изображение, а СУДН обеспечивает условия для осуществления данного процесса. Высокое пространственное разрешение в современных МКА достигается благодаря применению альтернативных технологий съемки — с замедлением бега изображения, с временной задержкой накопления. Использование таких технологий позволяет существенно улучшить качество получаемых изображений, но в то же время накладывает на СУДН серьезные дополнительные ограничения, к системе предъявляются определенные требования [1].

Анализ возникающих ограничений и требований к СУДН позволяет сделать вывод о необходимости свести процесс ориентации к ряду последовательных быстрых разворотов, непрерывно переходящих к точному программному наведению, при котором происходит регулирование углов и угловых скоростей вращения МКА. Очевидно, что при построении СУДН МКА следует применять самые современные технические решения, к которым относятся: аппаратура спутниковой навигации; измерители угловой скорости; высокоточные и высокоскоростные звездные датчики; высокопроизводительные маховики с системой измерения угловой скорости вращения маховика; малогабаритные датчики Солнца; магнитометры и магнитные приводы для разгрузки накапливаемого кинетического момента МКА. Кроме того, описанные чувствительные элементы (ЧЭ) и исполнительные органы СУДН могут применяться в разных режимах функционирования для обеспечения ориентации и стабилизации МКА. Так, например, учитывая задачи МКА «Аист-2Д», можно выделить следующие режимы функционирования его СУДН [2–4]: гашение угловых скоростей (ГУС) при приведении изделия в ориентированное положение; одноосная солнечная ориентация (ОСО); трехосная ориентация в орбитальной системе координат (ОСК); проведение экспериментов (ПЭ).

Вышеуказанные режимы работы СУДН МКА ДЗЗ могут существенно различаться не только по своему характеру, но и по интенсивности их применения. Так, в зависимости от задач, поставленных перед МКА ДЗЗ, процесса его движения по орбите, рассматриваемого интервала времени тот или иной режим может становиться то основным, то вспомогательным. Кроме того, разные режимы могут быть несовместными (т. е. задействоваться в непересекающиеся временные интервалы) либо выполняться параллельно с другими. Наконец, задействование тех или иных режимов может осуществляться в разных долях времени на заданном временном интервале или при разных значениях вероятности задействования на рассматриваемом интервале, т. е. может носить детерминированный или стохастический динамический характер.

Цель работы — провести анализ и оценку показателей структурно-функциональной надежности СУДН МКА ДЗЗ в разных условиях взаимодействия динамических режимов функционирования.

Подход к оценке структурно-функциональной надежности СУДН МКА ДЗЗ. Структурно-функциональный анализ сложных объектов, к которым относятся МКА, целесообразно начинать с построения схемы функциональной целостности (СФЦ) объекта [5, 6]. Такая схема является средством изображения структуры исследуемых свойств системных объектов. Она позволяет графически представить логические условия реализации собственных функций элементами и подсистемами, а также цели моделирования — логические условия реализации исследуемого системного свойства (например, безотказности или отказа объекта), реализации системой тех или иных режимов функционирования и т. п. Вершины СФЦ могут характеризовать как работоспособность тех или иных функциональных элементов объекта, так и потребности в реализации тех или иных функций и режимов его работы.

С учетом изложенного выше проведем исследование структурно-функциональной надежности СУДН МКА «Аист-2Д» [2], которая включает в себя чувствительные элементы и исполнительные органы. В настоящей работе рассматривается структура чувствительных элементов СУДН МКА. В состав ЧЭ СУДН МКА входят: одноосные измерители угловой скорости (ОИУС), 4 шт.; оптические солнечные датчики (ОСД), 2 шт.; мини-блок определения координат звезд (мБОКЗ), состоящий из блока электроники и оптических головок (ОГ), 2 шт.; приборы ориентации по Земле (ПОЗ), 2 шт.

Для приведенных выше режимов функционирования МКА уточним штатные алгоритмы ориентации. В штатной схеме режима гашения угловых скоростей для МКА «Аист-2Д» в качестве чувствительных элементов применяются ОИУС, при этом для нахождения вектора угловой скорости достаточно измерений трех любых ОИУС [2–4]. Для штатного режима ОСО также используются три любые ОИУС и один любой ОСД. Трехосная ориентация в ОСК осуществляется с помощью трех любых ОИУС и ПОЗ. Наконец, режим ПЭ заключается в определении ориентации с помощью прибора мБОКЗ.

Кроме штатных алгоритмов определения ориентации, разработчики бортовых систем используют и аварийные (нештатные) алгоритмы: приведения МКА в солнечную ориентацию с использованием ОСД и одного измерителя угловой скорости [7], не сонаправленного ни с одной из осей МКА; трехосной ориентации в ОСК с использованием ПОЗ и одного измерителя угловой скорости, расположенного в канале крена [8]; контрольно-резервной схемы высокоточного определения ориентации [9], которая основана на использовании

одного ОИУС в канале крена, одного прибора ориентации по Земле и одного ОГ мБОКЗ.

Из описания указанных выше алгоритмов ориентации видно, что ключевыми элементами рассматриваемой СУДН являются ОИУС, используемые во всех режимах функционирования МКА. При этом от расположения осей ОИУС относительно осей, связанных с МКА, зависят алгоритмы ориентации. Предлагаются различные схемы ориентации осей для четырех ОИУС [10]. В настоящей работе будет рассмотрена кубическая конфигурация, при которой три ОИУС расположены соосно осям МКА, а четвертый — по диагонали куба.

С помощью программного комплекса логико-вероятностного моделирования (ПК ЛВМ) «Арбитр» [5] была построена СФЦ СУДН для выполнения задачи определения ориентации МКА в различных режимах для рассматриваемой конфигурации ОИУС (рис. 1) [11]. Прокомментируем полученную СФЦ СУДН МКА. Вершины 1–10 отражают работоспособность вышеперечисленных ЧЭ СУДН. Потребности в задействовании режимов функционирования представлены вершинами 11–14 (ГУС, ОСО, ОСК и ПЭ соответственно). Вершины 15–33 являются фиктивными и используются для описания логических взаимосвязей элементов системы. Так, вершина 33 отражает успешное функционирование (достижение поставленной цели) СУДН МКА ДЗЗ.

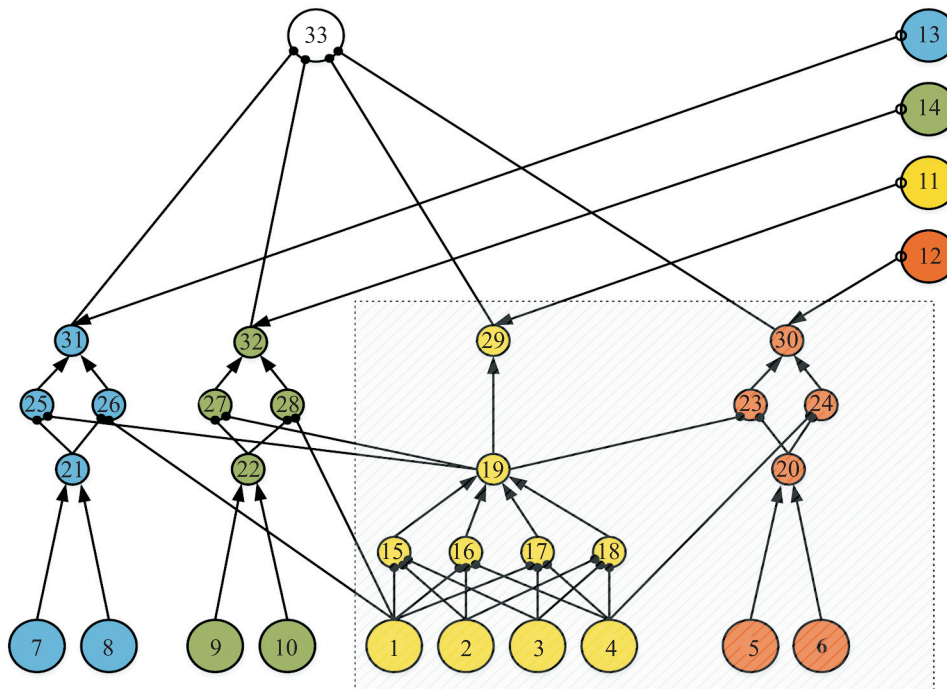


Рис. 1. Схема функциональной целостности системы управления движением и навигации для конфигурации «Куб»

При исследовании структурно-функциональной надежности СУДН МКА воспользуемся возможностью общего логико-вероятностного метода [5] и введем коэффициенты, так называемые веса режимов функционирования, которые учитывают указанные различия. Весовой коэффициент численно равен отношению средней суммарной длительности задействования режима в течение рассматриваемого интервала времени работы СУДН к величине данного интервала.

Следует отметить, что при исследовании групп несовместных событий (ГНС) [5] их наличие в СФЦ рассматриваемой системы автоматически учитывается при построении логических и вероятностных моделей.

Используя ПК ЛВМ «Арбитр» [5], получим для СФЦ СУДН МКА вероятностные многочлены успешного его функционирования

$$\begin{aligned} & \mathfrak{R}_c(P_1, \dots, P_n, P_{n+1}, \dots, P_{n+m}, Q_1, \dots, Q_n, Q_{n+1}, \dots, Q_{n+m}), \\ & \mathfrak{R}_p(P_1, \dots, P_n, P_{n+1}, \dots, P_{n+m}, Q_1, \dots, Q_n, Q_{n+1}, \dots, Q_{n+m}), \end{aligned}$$

где $\mathfrak{R}_c(P_1, \dots, P_n, P_{n+1}, \dots, P_{n+m}, Q_1, \dots, Q_n, Q_{n+1}, \dots, Q_{n+m})$ — вероятностный полином осуществления успешной ориентации МКА СУДН для режимов, не являющихся ГНС; $P_i(Q_i)$, $i = 1, \dots, 10$ — вероятность безотказной работы (отказа) ЧЭ СУДН МКА; $P_{10+i}(Q_{10+i})$, $i = 1, \dots, 4$ — интенсивность потребности в задействовании (невостребованности) режимов функционирования СУДН МКА; $\mathfrak{R}_p(P_1, \dots, P_n, P_{n+1}, \dots, P_{n+m}, Q_1, \dots, Q_n, Q_{n+1}, \dots, Q_{n+m})$ — вероятностный полином осуществления успешной ориентации МКА СУДН для режимов, представляющих собой ГНС.

Вычислим оценки структурно-функциональной надежности СУДН МКА, зависящие от интенсивности задействования режимов функционирования СУДН, которые обозначим через $\alpha_i = P_{10+i}$, $i = 1, \dots, 4$. Для вычисления данных оценок будем использовать:

параметрический геном для структуры без ГНС

$$\bar{\chi}_c(\alpha_1, \dots, \alpha_4) = (\chi_{c0}(\alpha_1, \dots, \alpha_4), \chi_{c1}(\alpha_1, \dots, \alpha_4), \dots, \chi_{c10}(\alpha_1, \dots, \alpha_4))^T$$

и геном для структуры с ГНС

$$\bar{\chi}_p(\alpha_1, \dots, \alpha_4) = (\chi_{p0}(\alpha_1, \dots, \alpha_4), \chi_{p1}(\alpha_1, \dots, \alpha_4), \dots, \chi_{p10}(\alpha_1, \dots, \alpha_4))^T \quad [12].$$

При вероятностном описании безотказной работы чувствительных элементов для однородной структуры (все значения вероятности безотказной работы элементов равны) [11, 12] показатель структурно-функциональной надежности можно вычислить по формуле

$$F_{\text{однор}}(\vec{\chi}(\alpha_1, \dots, \alpha_4)) = \int_0^1 \mathfrak{R}(P, \alpha_1, \dots, \alpha_4) dP = \vec{\chi}(\alpha_1, \dots, \alpha_4) \cdot \left(1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots, \frac{1}{11}\right)^T,$$

где $\vec{\chi}(\alpha_1, \dots, \alpha_4)$ — соответствующий параметрический геном для структуры без ГНС или с ГНС; $\mathfrak{R}(P, \alpha_1, \dots, \alpha_4)$ — многочлен, равный либо $\mathfrak{R}_c(P_1, \dots, P_{10}, P_{11}, \dots, P_{14}, Q_1, \dots, Q_{10}, Q_{11}, \dots, Q_{14})$, либо $\mathfrak{R}_p(P_1, \dots, P_{10}, P_{11}, \dots, P_{14}, Q_1, \dots, Q_{10}, Q_{11}, \dots, Q_{14})$ при условии, что $P_1 = P_2 = \dots = P_{10} = P$, $P_{11} = \alpha_1, P_{12} = \alpha_2, P_{13} = \alpha_3, P_{14} = \alpha_4$.

При исследовании неоднородной структуры (случай, когда значения вероятности безотказной работы ЧЭ различны) в качестве показателя структурно-функциональной надежности можно использовать выражение, представленное формулой

$$F_{\text{неоднор}}(\vec{\chi}(\alpha_1, \dots, \alpha_4)) = \vec{\chi}(\alpha_1, \dots, \alpha_4) \cdot \left(1, \frac{1}{2}, \frac{1}{2^2}, \dots, \frac{1}{2^n}\right)^T.$$

Если при выполнении функций ЧЭ, входящих в структуру СУДН МКА, не представляется возможным выявить достаточно определенную стохастическую закономерность безотказной работы, целесообразно использовать нечетко-возможностный подход к описанию поведения элементов, в основе которого лежит понятие пространства с мерой возможности [6].

Показателем структурно-функциональной надежности СУДН при нечетко-возможностном описании поведения его ЧЭ может выступать нечеткий интеграл по мере возможности [11, 12]:

$$F_{\text{одновозм}}(\vec{\chi}(\alpha_1, \dots, \alpha_4)) = \sup_{\mu \in [0,1]} \min \{R(\mu, \alpha_1, \dots, \alpha_4), g(\mu)\},$$

$$g(\mu) = \sup_{\gamma \in [0,1]} \min \{\gamma, G(\{\mu | R(\mu, \alpha_1, \dots, \alpha_4) \geq \gamma\})\}.$$

Отметим, что в случае совместного задействования режимов функционирования на параметры $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ в самом общем случае будут накладываться следующие ограничения: $0 \leq \alpha_i \leq 1, i = 1, \dots, m$.

При раздельном (несовместном) задействовании режимов функционирования кроме вышеуказанных ограничений требуется учитывать

дополнительное ограничение $\sum_{i=1}^m \alpha_i \leq 1$. Помимо раздельного и сов-

местного задействования, режимы функционирования могут быть либо равноценными по интенсивности задействования (т. е. $\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_m = \alpha$), либо неравноценными. Тогда в случае несовместного задействования равноценных по интенсивности режимов

ограничение $\sum_{i=1}^m \alpha_i \leq 1$ будет иметь вид $\alpha \leq \frac{1}{m}$. С учетом вышеизложенного для исследования структурно-функциональной надежности объекта введем следующие интегральные показатели:

$$J_{pp} = m \int_0^{1/m} F_*(\bar{\chi}_p(\alpha)) d\alpha; \quad (1)$$

$$J_{cp} = \int_0^1 F_*(\bar{\chi}_c(\alpha)) d\alpha; \quad (2)$$

$$J_{pn} = m! \iiint_{\substack{\alpha_1 + \dots + \alpha_m \leq 1 \\ 0 \leq \alpha_i \leq 1, i=1, \dots, m}} F_*(\bar{\chi}_p(\alpha_1, \dots, \alpha_m)) d\alpha_1 d\alpha_2 \dots d\alpha_m; \quad (3)$$

$$J_{cn} = \int_0^1 \int_0^1 \dots \int_0^1 F_*(\bar{\chi}_c(\alpha_1, \dots, \alpha_m)) d\alpha_1 d\alpha_2 \dots d\alpha_m, \quad (4)$$

где показатели, представленные формулами (1) и (2), позволяют оценивать обобщенную структурно-функциональную надежность объекта при раздельном и совместном задействовании равноценных по интенсивности режимов функционирования соответственно, а показатели, представленные формулами (3) и (4), — при раздельном и совместном задействовании неравноценных по интенсивности режимов функционирования соответственно. В формулах (1)–(4) подынтегральной функцией F_* могут выступать $F_{\text{однор}}$, $F_{\text{неоднор}}$ или $F_{\text{однорвозм}}$. Проведем исследования структурно-функциональной надежности ЧЭ СУДН МКА в разных условиях задействия режимов функционирования.

Результаты вычислительного эксперимента по выявлению рациональных соотношений задействия динамических режимов функционирования. Фрагмент полинома СФЦ СУДН МКА при задействовании режимов функционирования без учета ГНС для конфигурации «Куб» имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \mathfrak{R}_c(P, \alpha_1, \dots, \alpha_4) = & P^4(1-P)^6(1-\alpha_2)(1-\alpha_4) + \\ & + P^2(1-P)^3(1-\alpha_1)(1-\alpha_2)\alpha_3(1-\alpha_4) + \dots - 4P^5(1-\alpha_1)(1-\alpha_2)\alpha_3(1-\alpha_4). \end{aligned}$$

Полученный с помощью ПК ЛВМ «Арбитр» вероятностный полином безотказной работы ЧЭ СУДН включает более 300 мономов.

В случае задействия режимов функционирования с учетом ГНС соответствующий многочлен имеет более компактный вид:

$$\begin{aligned} \mathfrak{R}_p(P, \alpha_1, \dots, \alpha_4) = & 1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4 + 2(\alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4)P^2 + \\ & + (4\alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4)P^3 - (3\alpha_1 - 2\alpha_2 - 2\alpha_3 - 2\alpha_4)P^4 - \\ & - 3(\alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4)P^5 + (\alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4)P^6. \end{aligned}$$

Тогда параметрический геном для данной структуры с ГНС имеет следующий вид:

$$\bar{\chi}_c(\alpha_1, \dots, \alpha_4) = (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4, 0, 2\alpha_2 + 2\alpha_3 + 2\alpha_4, 4\alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4, -3\alpha_1 + 2\alpha_2 + 2\alpha_3 + 2\alpha_4, -3\alpha_2 - 3\alpha_3 - 3\alpha_4, \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4, 0, 0, 0, 0)^T.$$

В качестве исходной точки проводимого исследования возьмем наиболее частный случай — задействие режимов функционирования, представляющих собой группу несовместных событий и равноценных по интенсивности задействия. Для простоты вычисления будем считать, что на некотором интервале времени задействуются только два режима функционирования, например, ОСО и ГУС. Тогда начальное значение интенсивности задействия указанных режимов равно 0,5. Далее происходит изменение значений параметров интенсивности задействия режимов функционирования сначала в пользу одного, затем в пользу другого режима с учетом того, что они представляют собой группу несовместных событий. Затем рассматривается «перевес» значений интенсивности задействия каждого из режимов функционирования с учетом возможности их совместного задействия (без учета ГНС).

Результаты проведенных вычислительных экспериментов при совместном (без учета ГНС) и раздельном (с учетом ГНС) задействовании режимов представлены в таблице.

Значения показателей структурно-функциональной надежности

Вариант	Интенсивность		Структура		
	α_1	α_2	Неоднородная	Однородная	Возможная
<i>С учетом ГНС</i>					
1	0,5	0,5	0,367	0,43	0,458
2	0,4	0,6	0,378	0,436	0,458
3	0,3	0,7	0,389	0,442	0,458
4	0,2	0,8	0,4	0,448	0,458
5	0,1	0,9	0,411	0,454	0,458
6	0	1	0,422	0,46	0,458
7	0,6	0,4	0,356	0,424	0,458
8	0,7	0,3	0,345	0,418	0,458
9	0,8	0,2	0,334	0,412	0,458

Вариант	Интенсивность		Структура		
	α_1	α_2	Неоднородная	Однородная	Возможная
10	0,9	0,1	0,323	0,406	0,458
11	0	1	0,422	0,459	0,458
<i>Без учета ГНС</i>					
12	0,5	0,6	0,459	0,526	0,521
13	0,5	0,7	0,426	0,497	0,521
14	0,5	0,8	0,394	0,468	0,521
15	0,5	0,9	0,361	0,44	0,521
16	0,5	1	0,328	0,411	0,521
17	0,6	0,5	0,448	0,52	0,521
18	0,7	0,5	0,405	0,486	0,521
19	0,8	0,5	0,361	0,451	0,521
20	0,9	0,5	0,318	0,416	0,521
21	1	0,5	0,273	0,381	0,521
<p><i>Примечание:</i> вариант 1 — равноценное задействование режимов функционирования, варианты 2–21 — неравноценное.</p>					

На рис. 2 представлены изменения показателей структурно-функциональной надежности для различных вариантов интенсивности задействования режимов функционирования ЧЭ СУДН МКА с учетом и без учета ГНС. Вариант 1 отражает значения показателей надежности при равноценном несовместном задействовании режимов функционирования. Варианты 2–11 отражают изменение значений показателей структурно-функциональной надежности при отклонении интенсивности задействования режимов функционирования, представляющих собой ГНС, сначала в пользу режима ГУС — α_2 (варианты 2–6), а затем в пользу режима ОСО — α_1 (варианты 7–11). Изменение интегральных показателей надежностей в рассматриваемом случае можно охарактеризовать следующим образом: увеличение интенсивности задействования более предпочтительного по надежности режима приводит к повышению интегрального показателя надежности; большее время задействования менее предпочтительного режима снижает указанный показатель, что соответствует ожидаемому.

Варианты 12–21 отражают изменение значений показателей при увеличении интенсивности задействования одного из режимов функционирования при фиксированном значении интенсивности задействования другого режима с учетом возможности их совместного использования.

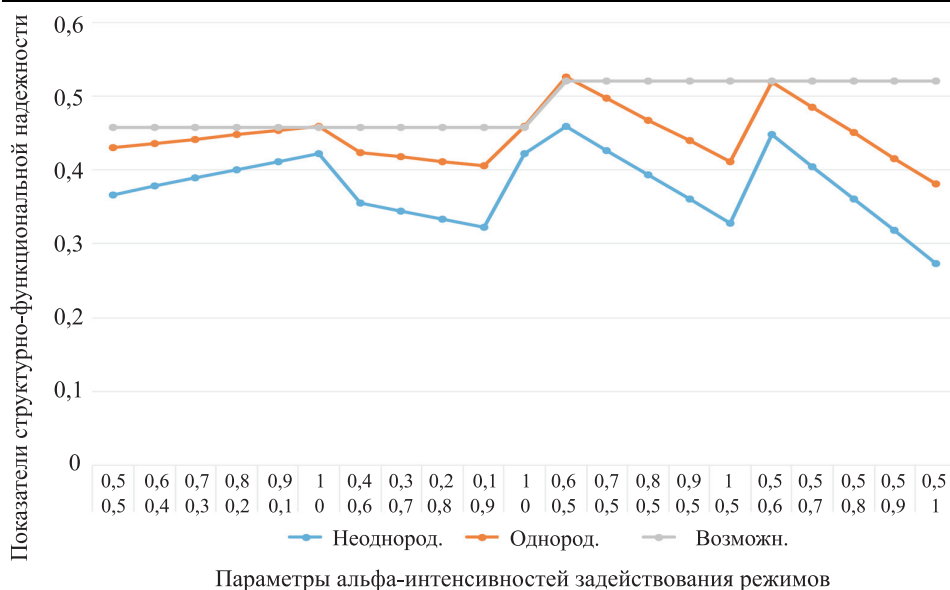


Рис. 2. Зависимость значений интегральных показателей от интенсивности задействования режимов функционирования СУДН МКА ДЗЗ

По данным, приведенным на графике, видно, что наибольшие значения показателей структурно-функциональной надежности достигаются в вариантах 12 и 17 для однородных и неоднородных структур. При росте интенсивности задействования обоих режимов наблюдается более существенное снижение значения интегрального показателя, что объясняется ростом времени параллельного выполнения обоих режимов, которые задействуют, в том числе и общие логически связанные функциональные элементы.

Следует отметить, что при прочих равных возможностная интегральная оценка зависит лишь от того, могут ли режимы параллельно выполняться. Ее изменение непротиворечиво ввиду того, что наличие параллельного режима функционирования потенциально позволяет осуществить реконфигурацию в случае отказа и исполнить требуемые функции альтернативным составом БА.

Заключение. Предложен подход к исследованию структурно-функциональной надежности сложных объектов путем вычисления интегральных показателей надежности с использованием параметрического генома структуры с учетом особенностей задействования режимов функционирования. Анализ приведенных результатов показал, что при решении задач многокритериального выбора структуры и параметров БКУ МКА ДЗЗ на этапах создания и проектирования требуется учитывать разные варианты задействования (совместное-несовместное, равноценное-неравноценное, однородное-неоднородное) динамических режимов функционирования, которые существенным

образом влияют на структурно-функциональную надежность элементов и подсистем БКУ МКА.

На примере двухрежимной функциональной структуры показана высокая адекватность предлагаемых интегральных оценок при вариациях интенсивности и совместности задействования режимов.

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ (№19-08-00989, 20-08-01046) в рамках бюджетной темы №0073-2019-0004.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Павлов А.Н. Комплексное моделирование структурно-функциональной реконфигурации сложных объектов. *Труды СПИИРАН*, 2013, вып. 5, с. 143–168.
- [2] 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. *Опытно-технологический малый космический аппарат «АИСТ-2Д»*. Самара, Изд-во СамНЦ РАН, 2017, с. 324.
- [3] Филатов А.В., Ткаченко И.С., Тюгашев Е.В., Сопченко Е.В. Математическое обеспечение системы управления движением МКА. *Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ–2015)*. Самара, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. акад. С.П. Королёва, 2015, с. 290–294.
- [4] Шипов М.Г. Гашение угловых скоростей КА «Аист-2Д» с использованием системы сброса кинетического момента. *Вестник Самар. ун-та. Сер. Авиационная и ракетно-космическая техника*, 2019, т. 18, № 2, с. 121–127.
- [5] Можаяев А.С., ред. *Применение общего логико-вероятностного метода для анализа технических, военных организационно-функциональных систем и вооруженного противоборства*. Санкт-Петербург, С.-Петерб. регион. отд. РАЕН, 2011, с. 416.
- [6] Калинов М.И., Родионов В.А. Обоснование выбора рационального варианта применения малых космических аппаратов при отказах отдельных элементов их бортовых систем. *Тр. Девятой Всерос. науч.-практ. конф. по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2019). 16–18 октября 2019 г.* Екатеринбург, Урал. гос. пед. ун-т, 2019, с. 434–438. URL: <http://simulation.su/uploads/files/default/2019-immmod-434-438.pdf>
- [7] Шипов М.Г., Стеклова А.А., Давыдов А.А. Приведение космического аппарата в солнечную ориентацию по измерениям одноосного датчика угловой скорости. *Вестник Самар. ун-та. Сер. Авиационная и ракетно-космическая техника*, 2020, т. 19, № 1, с. 96–105.
- [8] Беленький А.Д., Васильев В.Н., Семёнов М.Е. Ориентация и стабилизация космического аппарата «Метеор-М» № 2 в орбитальной системе координат. *Вопросы электромеханики. Тр. ВНИИЭМ*, 2018, т. 167, № 6, с. 3–8.
- [9] Богов А.Н., Сотников М.В., Вознюк А.М. Контрольно-резервная схема определения ориентации для КА дистанционного зондирования Земли. *Сб. тр. молодежной конф. ФГУП КБ «Арсенал»*, 2012, с. 146–149.
- [10] Mehdi Jafari. Optimal redundant sensor configuration for accuracy increasing in space inertial navigation system. *Aerospace Science and Technology*, 2015, vol. 47, pp. 467–472.
- [11] Pavlov A., Pavlov D., Vorotyagin V., Umarov A. Structural and functional analysis of supply chain reliability in the presence of demand fluctuations. *Proc.*

Models and Methods for Researching Information Systems in Transport (MMRIST 2020). St. Petersburg, Dec. 11–12, 2020. CEUR-WS, 2021, vol. 2803, pp. 61–66.

- [12] Павлов А.Н., Павлов Д.А., Алешин Е.Н., Воротягин В.Н., Умаров А.Б. Моделирование и анализ структурно-функциональной надежности сложных многорежимных объектов. *Тр. ВКА им. А.Ф. Можайского*. Санкт-Петербург, 2021, вып. 677, с. 186–194.

Статья поступила в редакцию 22.06.2021

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Павлов А.Н., Павлов Д.А., Кулаков А.Ю., Умаров А.Б. Исследование структурно-функциональной надежности системы управления движением и навигации малого космического аппарата в условиях многорежимности ее функционирования. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2021, вып. 11.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-11-2128>

Павлов Александр Николаевич — д-р техн. наук, профессор, профессор 94 кафедры Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского, ведущий научный сотрудник Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра Российской академии наук. Область научных интересов: системный анализ и принятие решений в условиях существенной неопределенности; теория управления структурной динамикой сложных организационно-технических систем. Автор более 250 научных публикаций. e-mail: vka@mil.ru

Павлов Дмитрий Александрович — канд. техн. наук, преподаватель 93 кафедры Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. Область научных интересов: разработка научных основ теории управления структурной динамикой сложных организационно-технических систем. Автор 50 публикаций. e-mail: vka@mil.ru

Кулаков Александр Юрьевич — канд. техн. наук, старший научный сотрудник Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра Российской академии наук. Область научных интересов: разработка научных основ теории управления структурной динамикой сложных организационно-технических систем. e-mail: russ69@bk.ru

Умаров Александр Бахтиёрович — адъюнкт 94 кафедры Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. Область научных интересов: разработка научных основ теории управления структурной динамикой сложных организационно-технических систем. Автор 11 публикаций. e-mail: vka@mil.ru

Investigation of the structural and functional reliability of the motion control and navigation system of a small spacecraft in the conditions of its multi-mode operation

© A.N. Pavlov¹, D.A. Pavlov¹, A.Yu. Kulakov², A.B. Umarov¹

¹Mozhaysky Military Space Academy, St. Petersburg, 197198, Russia

²St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 199178, Russia

In the course of the design, creation and application of complex multi-mode systems, which undoubtedly include the motion control system of small spacecraft for remote sensing of the Earth, when choosing the configuration of elements and connections between them, as well as the parameters of the system, it is advisable to explore the possibilities of using dynamic operation modes significantly affecting the structural and functional reliability of the system. Based on the new original concept of the parametric genome of the complex multi-mode object structure, introduced by the authors, the article describes the results of the studies of the influence of various options for activating the modes of operation on the structural and functional reliability of the motion control and navigation system of the small spacecraft "Aist-2D". To assess the structural and functional reliability of the system under study integral indicators have been introduced. At the same time, the possibility of involving joint activation of the modes of operation, the equivalence of the intensities of utilizing the activation of the modes of operation and the homogeneity of the traffic control system were taken into account.

Keywords: *modes of system functioning, rational ratio of modes activation, structural and functional reliability, consistency of mode activation, intensity of modes activation*

Research carried out on this topic was performed with partial financial support from RFBR grants (No. 19-08-00989, 20-08-01046), within the framework of the budget theme No. 0073-2019-0004.

REFERENCES

- [1] Pavlov A.N. *Informatika i avtomatizatsiya (Trudy SPIIRAN) — Informatics and Automation (SPIIRAS Proceedings)*, 2013, no. 5, pp. 143–168.
- [2] Kirilin A.N., Akhmetov R.N., Shakhmatov E.V., Tkachenko S.I., Baklanov A.I., Salmin V.V., Semkin N.D., Tkachenko I.S., Goryachkin O.V. *Opytno-tekhnologicheskij malyy kosmicheskij apparat «AIST-2D»* [Experimental technological small spacecraft "AIST-2D"]. Samara, Samara Scientific Center of the RAS Publ., 2017, 324 p.
- [3] Filatov A.V., Tkachenko I.S., Tugashev E.V., Sopchenko E.V. *Matematicheskoe obespechenie sistemy upravleniya dvizheniyem malykh kosmicheskikh apparatov* [Mathematical support for the motion control system of the small spacecraft]. *Materialy Mezhdunarodnoy konferentsii i molodezhnoy shkoly "Informatsionnye tekhnologii i nanotekhnologii"* [Materials of the International Conference and youth school "Information technology and nanotechnology"]. Samara, Samarskiy nauchnyy tsentr RAN, 2015, pp. 290–294.
- [4] Shipov M.G. *Vestnik samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie — Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, 2019, vol. 18, no. 2, pp. 121–127.

- [5] Polenin V.I., Ryabinin I.A., Svirin S.K., Gladkova I.A. *Primenenie obshchego logiko–veroyatnostnogo metoda dlya analiza tekhnicheskikh, voennykh organizatsionno–funktsionalnykh sistem i vooruzhennogo protivoborstva: monografiya* [Application of the general logical-probabilistic method for the analysis of technical, military organizational-functional systems and armed confrontation: monograph]. St. Petersburg, Saint Petersburgskoe regionalnoe otделение RAEN Publ., 2011, 416 p.
- [6] Kalinov M.I., Rodionov V.A. Obosnovanie vybora ratsionalnogo varianta primeneniya malykh kosmicheskikh apparatov pri otkazakh otdelnykh elementov ikh bortovykh system [Justification of the choice of a rational option for the use of small spacecraft in case of failure of individual elements of their onboard systems]. *IX Vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya po imitatsionnomu modelirovaniyu i ego primeniyu v nauke i promyshlennosti (IMMOD–2019): sbornik trudov* [Proceedings of the IX All-Russian Scientific and Practical Conference on Simulation and Its Application in Science and Industry (IMMOD–2019)]. Ekaterinburg, Uralskiy gosudarstvennyy pedagogicheskiy universitet Publ., 2019, pp. 434–438.
- [7] Shipov M.G., Steklova A.A., Davydov A.A. *Vestnik samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie — Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, 2020, vol. 19, no. 1, pp. 96–105.
- [8] Belenky A.D., Vasilyev V.N., Semonov M.E. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIEM — Electromechanical matters. VNIEM studies*, 2018, vol. 167, no. 6, pp. 3–8.
- [9] Bogov A.N., Sotnikov M.V., Voznyuk A.M. Kontrolno-rezervnaya skhema opredeleniya orientatsii dlya KA distantsionnogo zondirovaniya Zemli [Control and backup scheme for determining the orientation for the Earth remote sensing spacecraft]. *Sbornik trudov molodozhnoy konferentsii FGUP KB Arsenal* [Proceedings of the FSUE Design Bureau Arsenal Youth Conference]. St. Petersburg, FSUE “KB “Arsenal”, BSTU “Voenmekh” Publ., 2012, pp. 146–149.
- [10] Mehdi Jafari. *Aerospace Science and Technology*, 2015, vol. 47, pp. 467–472.
- [11] Pavlov A.N., Pavlov D.A., Vorotyagin V.N., Umarov A.V. Structural and functional analysis of supply chain reliability in the presence of demand fluctuations. *Proceedings of the Workshop “Models and Methods for Researching Information Systems in Transport 2020” on the basis of the departments “Information and Computer Systems” and “Higher Mathematics” Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (MMRIST–2020 St. Petersburg, Russian Federation, Dec. 11–12, 2020)*. St. Petersburg, CEUR-WS Proceedings Publ., 2021, vol. 2803, pp. 61–66.
- [12] Pavlov A.N., Pavlov D.A., Aleshin E.N., Vorotyagin V.N., Umarov A.B. *Trudy Voenno-kosmicheskoy akademii imeni A.F.Mozhayskogo — Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*, 2021, no. 677, pp. 186–194.

Pavlov A.N., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department 94, Mozhaysky Military Space Academy; Leading Researcher, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences; author of over 250 research publications. Research interests: system analysis and decision-making under conditions of significant uncertainty, the theory of managing the structural dynamics of complex organizational and technical systems. e-mail: vka@mil.ru

Pavlov D.A., Cand. Sc. (Eng.), Lecturer, Department 93, Mozhaisky Military Space Academy; author of over 50 research publications. Research interests: development of scientific foundations of the theory of managing the structural dynamics of complex organizational and technical systems. e-mail: vka@mil.ru

Kulakov A.Yu., Cand. Sc. (Eng.), Senior Research Fellow, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences. Research interests: development of scientific foundations of the theory of structural dynamics management of complex organizational and technical systems. e-mail: russ69@bk.ru

Umarov A.B., Adjunct, Department 94, Mozhaysky Military Space Academy, author of 11 research publications. Research interests: development of scientific foundations of the theory of managing the structural dynamics of complex organizational and technical systems. e-mail: vka@mil.ru