

Труды МАИ. 2023. № 132
Trudy MAI, 2023, no. 132

Научная статья

УДК 629.7

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=176859>

СПОСОБ ОПЕРАТИВНОГО ОЦЕНИВАНИЯ ЖИВУЧЕСТИ МНОГОРЕЖИМНЫХ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Александр Николаевич Павлов¹, Андрей Владимирович Гордеев^{2✉}, Валентин Николаевич Воротягин³

^{1,2,3}Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

Санкт-Петербург, Россия,

¹Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

²vka@mil.ru ✉

Аннотация. Одной из актуальных задач исследования структурно-сложных объектов при их многорежимном функционировании выступает задача оценивания показателей надежности и живучести с учетом структурно-функциональных особенностей реализации режимов. В статье показано, что задача оценивания показателя живучести для монотонных структурно-сложных объектов путем перебора работоспособных состояний системы и вариантов деструктивных воздействий относится к суперсложным комбинаторным задачам. Это требует искать пути ухода от полного перебора, в том числе за счет использования полинома работоспособности объекта, в котором хранятся различные топологические свойства структурно-функционального взаимодействия элементов системы при реализации

режимов функционирования. Используя прямой и двойственный параметрический геном структуры многорежимного объекта введены интегральные показатели структурно-функциональной надежности, а также формула оперативного приближенного расчета значений структурно-функциональной живучести. В качестве многорежимного сложного объекта в статье рассмотрена система управления движением малого космического аппарата. При неизвестной циклограмме реализации режимов ориентации и в условиях пространственных деструктивных воздействий, обладающий i -ой кратностью, т.е. по результату одного деструктивного воздействия в системе наблюдается одновременно i отказавших элементов, проведены и представлены расчеты приближенных значений показателей структурно-функциональной живучести для различных крайних условий задействования режимов ориентации космического аппарата.

Ключевые слова: многорежимный сложный объект, структурно-функциональная живучесть, параметрический геном структуры

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-19-00767, <https://rscf.ru/project/22-19-00767>)

Для цитирования: Павлов А.Н., Гордеев А.В., Воротягин В.Н. Способ оперативного оценивания живучести многорежимных сложных объектов // Труды МАИ. 2023. № 132. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=176859>

Original article

A METHOD OF OPERATIONAL ASSESSMENT OF SURVIVABILITY OF MULTIMODE COMPLEX OBJECTS

Aleksandr N. Pavlov¹, Andrei V. Gordeev^{2✉}, Valentin N. Vorotyagin³

^{1,2,3}Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky,

Saint Petersburg, Russia

¹St.Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences,

Saint Petersburg, Russia

²vka@mil.ru ✉

Abstract. One of the urgent tasks of the structurally complex objects studying with their multi-mode functioning is the task of reliability and survivability indicators assessing with regard to the structural and functional specifics of modes implementation. The article demonstrates that the problem of the survivability index estimating for monotonous structurally complex objects by iterating through the functional states of the system and variants of destructive impacts refers to the super-complex combinatorial problems. This requires searching for the ways for the exhaustive search avoidance, including the one through the object operability polynomial application, which stores various topological properties of the structural and functional interaction of the system elements in the functioning modes implementation. Integral indicators of structural and functional reliability, as well as a formula for the operational approximate computing of structural and functional survivability values were introduced employing applying direct and dual parametric genome of the multimode object structure. The article considers the motion control system of a small spacecraft as a multi-mode complex object. Computations were

performed and presented with an unknown cyclogram of the orientation modes implementation, and under conditions of spatial destructive impacts of the i -th multiplicity. In other words, by the result of one destructive impact, i failed elements, are observed simultaneously in the system; calculations of approximate values of structural and functional survivability indicators for various extreme conditions for the use of spacecraft orientation modes. Indicators of structural and functional reliability and survivability of multi-mode objects are proposed, which will allow analyzing and evaluating the properties of reliability and survivability of a particular configuration option during system degradation.

Keywords: multi-mode complex object, structural and functional survivability, parametric structure genome

Funding: research on this topic was carried out with partial financial support from RFBR grants (No. 22-19-00767, <https://rscf.ru/project/22-19-00767>)

For citation: Pavlov A.N., Gordeev A.V., Vorotyagin V.N. A method of operational assessment of survivability of multimode complex objects. *Trudy MAI*, 2023, no. 132. **URL:** <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=176859>

Введение

Решение проблемы комплексного оперативного оценивания показателя живучести многорежимных сложных объектов (СЛО) с точки зрения его структурной уязвимости и функциональности является довольно востребованной в различных предметных отраслях – в промышленности, транспорте, оборонном ведомстве.

Причем общий смысл понятия «живучесть» СЛО можно сформулировать как «выносливость к повреждениям» и, как правило, оно напрямую связано со свойством

надёжности работы отдельных функциональных элементов и подсистем объекта. Однако свойство живучести имеет более широкое понятие, чем свойство надёжности, так как живучесть рассматривается в ряде отраслей техники, как свойство системы сохранять и восстанавливать свои характеристики при воздействиях среды катастрофического характера [1]. Следует отметить, что, хотя интерес к исследованию живучести как в нашей стране, так и за рубежом возобновился с конца 80-х годов прошлого столетия, в теоретическом плане «практически отсутствует единая система понятий, показателей живучести, условий функционирования, при которых должна проявляться живучесть и требования к живучести»[2].

Под функциональным элементом (ФЭ) будем понимать часть системы, реальную или абстрактную, которая производит взаимодействие (физическое, энергетическое или информационное) с внешней средой посредством нескольких входов и выходов. ФЭ выполняет функцию (иногда несколько), связанных с выполнением этапов программы управления объектом [3].

Как правило, современные СЛО являются многофункциональными. Если же СЛО предназначен для выполнения одной функции (нескольких функций), то ее (их) реализацию может осуществлять в различных режимах, взаимодействие которых (технология управления структурами объекта) зависит от поставленной целевой задачи.

Под «живучестью» СЛО понимают его свойство сохранять способность выполнять свои функции в условиях деструктивных воздействий, с заданной эффективностью. В более «широком смысле» понимают способность СЛО восстанавливаться и выполнять своё функциональное назначение даже после

массового внешнего воздействия как естественной, так и направленной деструкции её элементов.

Указанные неблагоприятные (деструктивные) воздействия способны ухудшить качество функционирования объекта вплоть до потери работоспособности. Данные воздействия могут приводить к различным последствиям, влияющим на выполнения целевой задачи: потерю работоспособности ФЭ или ухудшение безотказности работы ФЭ (физическое разрушение или нарушения целостности); изменение (ухудшение) характеристик, выполняемых ФЭ функций; изменение режимов (алгоритмов) функционирования объекта; уменьшение структурной, функциональной, технологической избыточности, уровня запасов ресурсов. Возможны и более тяжелые последствия.

Для анализа свойства живучести и разработки методологических и методических основ обеспечения живучести многорежимных СЛО следует учитывать факторы, определяющие живучесть объекта, а также ввести показатели живучести системы.

По функциональному признаку факторы, определяющие живучесть СЛО, следует разбить на три группы [1, 2]: факторы, характеризующие деструктивные воздействия (точечные, плоскостные, объемные воздействия, количество поражающих факторов, импульсные и/или конечной продолжительности воздействия, интенсивность воздействий, однократные и/или многократные воздействия и др.); факторы, характеризующие ФЭ СЛО со стороны живучести (стойкость отдельных элементов, топология системы в целом, устойчивость к развитию последствий воздействий, безотказность элементов, противоаварийная

защита, резервирование, восстановление и пр.); факторы, характеризующие средства обеспечения живучести.

Накопленные знания по исследованиям проблем управления структурно-сложными объектами позволяет отметить о значительном опыте в решении задач статического и логико-вероятностного анализа свойств надёжности, живучести и безопасности таких объектов [5–7].

Необходимо особо выделить, что проведенные исследования [8–11] позволили с использованием метода логико-вероятностного моделирования структурно-сложных объектов при построении схем функциональной целостности (СФЦ) СЛО [12], с одной стороны, совместно описать функциональную и технологическую структуру объекта. С другой стороны, предложить концепцию прямого и двойственного генома (для многорежимного объекта – параметрического генома) структуры, построенную на уникальном представлении структуры объекта в виде вектор-функции коэффициентов полинома структурной функции надежности, которая сконцентрировала в себе знания экспертов о взаимодействии ФЭ СЛО, при этом часть вершин схемы функциональной целостности показывают работоспособность (исполнение функции элементом), другая часть отражает необходимую потребность в выполнении заложенных режимов функционирования этих элементов [10, 11]. При этом исследовались как совместные, так и несовместные события возникновения потребности в реализации режимов функционирования с равномерной или неравномерной интенсивностью их реализации. Под интенсивностью реализации режимов функционирования понималось отношение

средней суммарной длительности задействования режима в течение рассматриваемого временного интервала работы СЛО к величине этого интервала.

Краткое описание подхода к анализу живучести монотонных сложных объектов

Важным и необходимым условием исследования живучести СЛО является выполнение анализа и оценивания строения его структурных состояний, представляющих как функциональные, так и технологические тонкости управления объектом.

Структурные модели функционирования большей части сложных технических систем корректно представляются [1, 2, 8–13, 14] блок-схемами, деревьями отказов и событий, графами связности, многотерминальными сетями и т.п. Отмечается, что данные структурные модели отображают функционирование только монотонных систем первого типа [16], т.е. системы, структуру которых можно описать с помощью графовых моделей. Для исследования живучести таких СЛО, как правило, используют минимальные сечения (разрезы) или кратчайшие пути для оценивания связности исходного графа (вероятности его связности). При этом считают СЛО «разрушенным», если в случае удаления вершин или ребер графа он будет удовлетворять одному или нескольким следующим условиям [16]:

- граф состоит минимум из двух компонент связности;
- не существует направленных путей для определенных множеств вершин; количество вершин в наибольшей компоненте графа, меньше некоторого заранее заданного числа;
- кратчайший путь превышает некоторую заданную величину.

В целях анализа свойства живучести СЛО, а также для синтеза системы, имеющей свойство живучести, следует учитывать вариацию сценария деструктивного воздействия и найти количественную оценку, релевантно отражающую рассматриваемое свойство [17].

Так в работах [13, 19] рассматривался сценарий пространственного воздействия, обладающий i -ой кратностью, т.е. по результату одного деструктивного воздействия в системе наблюдается одновременно i дефектов – отказавших ФЭ. Такой подход характерен для СЛО, в которых разовое воздействие вызывает множественные последствия (например, стихийное бедствие или военный удар).

В рассматриваемом случае было введено понятие обобщенного отказа i -ой кратности, при котором учитываются структурные состояния СЛО, возникающие при последовательном отказе всевозможных сочетаний (C_n^i) из всего множества ФЭ структуры по i различным ФЭ ($i \leq n$, где n число ФЭ рассматриваемой структуры СЛО). Разделим множество структурных состояний обобщенного отказа на два подмножества, работоспособных состояний и неработоспособных, и обозначим мощность выделенных подмножеств через R_i и N_i ($R_i + N_i = C_n^i$) [1].

Далее, с учетом предположения распределения случайной величины, описывающей попадание групп ФЭ под деструктивные воздействия, по равномерному закону, **относительная функция живучести** СЛО описывается следующим выражением $\Psi(i, n) = \frac{R_i}{C_n^i} = 1 - \frac{N_i}{C_n^i}$, затем выполняется ее линейная

интерполяция кусочно-линейной функцией $\tilde{\Psi}(x)$, $x \in [0,1]$ и вводится **интегральный показатель живучести** СЛО в виде следующего функционала $G = \int_0^1 \tilde{\Psi}(x) dx$.

В работах [2, 4] приведены деструктивные воздействия СЛО, представленные такими распределениями как, усечённое биномиальное или пуассоновское, которые возможно учитывать при вычислении показателя живучести СЛО.

Полагаем, что СЛО находится в *неработоспособном структурном состоянии*, когда в сборательном отказе убраны все элементы, входящие, хотя бы в одно из минимальных сечений отказов структуры.

В обобщающем случае структура СЛО обладает k минимальными сечениями отказов, каждый из них включает в себя m_j ($j=1, \dots, k$) элементов. При этом сечения отказов содержат общие элементы. Тогда число неработоспособных структурных состояний при обобщенном отказе i -ой кратности примет следующий вид [16, 18]:

$$\begin{aligned}
 N_i = & \sum_{j=1}^k \delta(i - m_j) C_{n-m_j}^{i-m_j} - \sum_{j_1=1}^k \sum_{j_2 > j_1}^k \delta(i - m_{j_1} - m_{j_2} + m_{j_1 j_2}) C_{n-m_{j_1} - m_{j_2} + m_{j_1 j_2}}^{i-m_{j_1} - m_{j_2} + m_{j_1 j_2}} + \\
 & + \sum_{j_1=1}^k \sum_{j_2 > j_1}^k \sum_{j_3 > j_2}^k \delta(i - m_{j_1} - m_{j_2} - m_{j_3} + m_{j_1 j_2 j_3}) C_{n-m_{j_1} - m_{j_2} - m_{j_3} + m_{j_1 j_2 j_3}}^{i-m_{j_1} - m_{j_2} - m_{j_3} + m_{j_1 j_2 j_3}} - \dots \\
 & \dots (-1)^{k-1} \delta(i - m_{j_1} - m_{j_2} - \dots - m_{j_k} + m_{j_1 j_2 \dots j_k}) C_{n-m_{j_1} - m_{j_2} - \dots - m_{j_k} + m_{j_1 j_2 \dots j_k}}^{i-m_{j_1} - m_{j_2} - \dots - m_{j_k} + m_{j_1 j_2 \dots j_k}}
 \end{aligned} \tag{1}$$

В формуле (1) $\delta(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$ – дискретная функция Хэвисайда, а величины $m_{j_1 j_2 \dots j_k}$ отражают сумму общих элементов в минимальных сечениях отказов с номерами j_1, j_2, \dots, j_k .

Применив формулу (1) возможно вычислить относительную функцию живучести монотонных СЛО первого типа и соответственно определить

интегральный показатель живучести системы $G = \int_0^1 \tilde{\Psi}(x) dx$. При этом

учитывается, что применяя формулу (1) расчет значения показателя живучести становится «тяжелой» комбинаторной задачей. Вычислительная сложность проблемы оценки живучести не позволяет разрешить её простейшим перебором состояний СЛО и вариантов деструктивных воздействий. Кроме того, не все монотонные структуры могут быть описаны с использованием графовых моделей. Так, например, системы, работающие по принципу «k из n», не могут быть представлены графом, хотя являются монотонными системами второго типа.

Поэтому для экспресс-анализа живучести СЛО и для получения приближённых оценок функций живучести монотонных систем как первого, так и второго типа был предложен метод оперативного вычисления на основе концепции генома структуры [18].

Составляющими генома структуры $\chi = (\chi_0, \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n)$ являются коэффициенты полинома отказа $T(Q) = \chi_0 + \chi_1 Q + \chi_2 Q^2 + \dots + \chi_n Q^n$, а составляющие *двойственного генома* структуры $\eta = (\eta_0, \eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n)$ являются коэффициенты полинома $R(P) = \eta_0 + \eta_1 P + \eta_2 P^2 + \dots + \eta_n P^n$ надёжной работы СЛО, состоящих из однородных по вероятности безотказной работы ФЭ. Геном структуры СЛО содержит атрибуты минимальных сечений отказов и его первая ненулевая компонента $\chi_r, r > 0$ равна числу минимальных сечений отказов мощности r . Тогда двойственный геном содержит минимальные пути успешного функционирования, где $\eta_l, l > 0$ равна числу минимальных путей мощности l .

Для вычисления оценки показателя живучести СЛО возможно применить геном и его двойственный аналог [18, 19]. Графическая интерпретация определения приближенной оценки живучести СЛО представлено на рисунке 1. Так первые ненулевые компоненты генома и двойственного генома структуры позволяют

вычислить величины $a = 1 - \frac{\chi_k}{C_n^k}$ и

$b = \min \{1 - \frac{\chi_k}{C_n^k}, \frac{\eta_l}{C_n^l}\}$. Тогда приближенную оценку структурной живучести можно

вычислить следующим образом

$$\begin{aligned} \tilde{G} &= \frac{k-1}{n} + \frac{1+a}{2} \cdot \frac{1}{n} + \frac{a+b}{2} \cdot \frac{n-k-l}{n} + \frac{b}{2} \cdot \frac{1}{n} = \\ &= \frac{2k-1}{2n} + \left(1 - \frac{\chi_k}{C_n^k} + \min \left\{1 - \frac{\chi_k}{C_n^k}, \frac{\eta_l}{C_n^l}\right\}\right) \cdot \frac{n-k-l+1}{2n}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\chi_k > 0, \chi_i = 0 \forall 0 < i < k; \eta_l > 0, \eta_j = 0 \forall 0 < j < l$

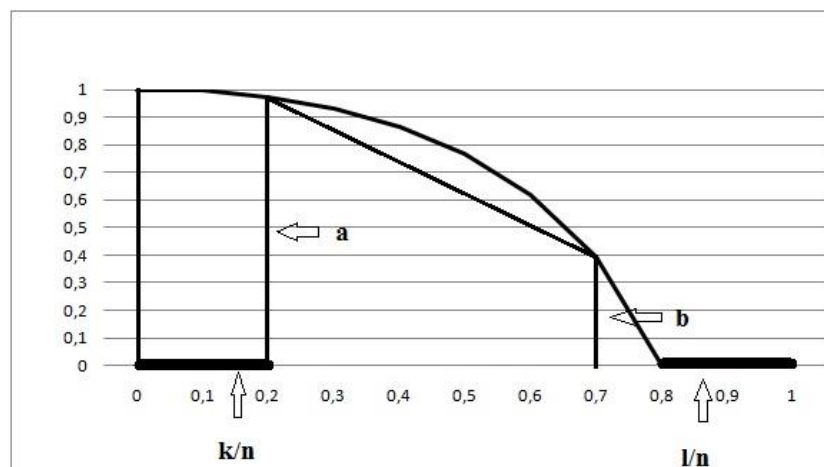


Рис. 1 Графическая интерпретация вычисления приближенной оценки живучести СЛО

Оперативное оценивание показателей живучести многорежимного СЛО при неизвестной циклограмме реализации режимов функционирования

Для исследования свойств надежности и живучести многорежимных СЛО с перестраиваемой структурой, основанном на общем логико-вероятностном методе (ОЛВМ), при построении СФЦ объекта были введены функциональные вершины, отражающие события возникновения потребности в реализации его режимов функционирования.

При построении СФЦ указывается интенсивность режимов и их совместное и/или несовместное задействование в соответствии с технологическим циклом управления СЛО. Однако, когда циклограмма задействования режимов и их интенсивности являются неопределенными (как правило, это бывает на этапах проектирования и создания СЛО) для оценивания потенциальных возможностей СЛО требуется рассматривать крайние варианты технологии управления СЛО (взаимодействия событий возникновения потребности в реализации режимов функционирования). Для многорежимных объектов такими вариантами могут быть: события возникновения потребности являются совместными, т.е. в каждый момент времени рассматриваемого интервала применения СЛО может потребоваться любой режим и его реализация не снимает потребность в остальных; события возникновения потребности являются несовместными, т.е. в каждый момент времени может потребоваться какой-то режим и его реализация снимает потребность в остальных режимах. Причем потребность в реализации режимов функционирования может возникать с одинаковой или различной интенсивностью.

Для этих двух крайних вариантов реализации режимов функционирования с применением ППП «Арбитр» [12] рассчитываются вероятностные полиномы (ВП) успешного функционирования СЛО при совместных событиях возникновения потребности в режимах $\mathfrak{R}_c(P_1, \dots, P_n, \alpha_1, \dots, \alpha_m)$ и при несовместных событиях - $\mathfrak{R}_p(P_1, \dots, P_n, \alpha_1, \dots, \alpha_m)$. Здесь $P_i, i=1, \dots, n$ - вероятность безотказной работы ФЭ СЛО, а $\alpha_i, i=1, \dots, m$ - интенсивность реализации режимов функционирования СЛО.

Далее преобразуем ВП успешного функционирования объекта с учетом однородности элементов объекта (т.е. $P_1 = P_2 = \dots = P_n = P$) к виду

$$\mathfrak{R}(P, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) = \chi_0(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) + \chi_1(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)P + \chi_2(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)P^2 + \dots + \chi_n(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)P^n$$

Вектор-функция коэффициентов полученного полинома

$$\vec{\chi}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) = (\chi_0(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m), \chi_1(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m), \chi_2(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m), \dots, \chi_n(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m))^T$$

называется параметрическим геномом структуры [13, 18].

Применив параметрический геном структуры, становится возможным рассчитывать показатели надежности с учетом структурно-функциональных особенностей реализации режимов с заданной интенсивностью СЛО для однородной и неоднородной (одинаковая или различная вероятность безотказной работы ФЭ СЛО) по следующим формулам [13, 18]:

$$F_{\text{однор}}(\vec{\chi}(\alpha_1, \dots, \alpha_m)) = \vec{\chi}(\alpha_1, \dots, \alpha_m) \cdot (1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots, \frac{1}{n+1})^T, \quad (3)$$

$$F_{\text{неоднор}}(\vec{\chi}(\alpha_1, \dots, \alpha_m)) = \vec{\chi}(\alpha_1, \dots, \alpha_m) \cdot (1, \frac{1}{2}, \frac{1}{2^2}, \dots, \frac{1}{2^n})^T. \quad (4)$$

Согласно терминологии, введенной И.Б. Шубинским в работах [19, 20] и развитой авторами работ [2, 4], данные показатели далее будем называть показателями структурно-функциональной надежности.

С учётом показателей (3)-(4), вводятся интегральные показатели структурно-функциональной надежности [13] многорежимного объекта

$$J_{pp} = m \cdot \int_0^{1/m} F_*(\bar{\chi}_p(\alpha)) d\alpha, \quad (5)$$

$$J_{cp} = \int_0^1 F_*(\bar{\chi}_c(\alpha)) d\alpha, \quad (6)$$

$$J_{pn} = m! \cdot \iiint_{\substack{\alpha_1 + \dots + \alpha_m \leq 1 \\ 0 \leq \alpha_i \leq 1, i=1, \dots, m}} F_*(\bar{\chi}_p(\alpha_1, \dots, \alpha_m)) d\alpha_1 d\alpha_2 \dots d\alpha_m, \quad (7)$$

$$J_{cn} = \int_0^1 \int_0^1 \dots \int_0^1 F_*(\bar{\chi}_c(\alpha_1, \dots, \alpha_m)) d\alpha_1 d\alpha_2 \dots d\alpha_m, \quad (8)$$

где показатели (5) и (6) предназначены для оценивания показателей структурно-функциональной надежности объекта при соответственно несовместных и совместных событиях возникновения потребности в реализации режимов функционирования с равномерной интенсивностью их задействования, а показатели (7) и (8) - при соответственно несовместных и совместных событиях с неравномерной интенсивностью задействования режимов функционирования. Причем

$$F_*(\bar{\chi}(\alpha_1, \dots, \alpha_m)) \in \{F_{\text{однор}}(\bar{\chi}(\alpha_1, \dots, \alpha_m)), F_{\text{неоднор}}(\bar{\chi}(\alpha_1, \dots, \alpha_m))\}.$$

В самом общем виде для случая однородной или неоднородной структуры подынтегральное выражение можно представить следующим образом

$$F_*(\bar{\chi}(\alpha_1, \dots, \alpha_m)) = \beta_0 + \sum_{i=1}^m \beta_i \alpha_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=i+1}^m \beta_{ij} \alpha_i \alpha_j + \sum_{i=1}^m \sum_{j=i+1}^m \sum_{k=j+1}^m \beta_{ijk} \alpha_i \alpha_j \alpha_k + \dots + \beta_{12\dots m} \alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_m.$$

Это выражение позволяет вычислить интегральные показатели структурно-функциональной надежности однородного или неоднородного СЛО в условиях неизвестной циклограммы реализации режимов функционирования для четырех крайних вариантов [13, 16] (вариант 1 – «несовместные равномерные» режимы (9), вариант 2 – «совместные равномерные» режимы (10), вариант 3 – «несовместные неравномерные» режимы (11), вариант 4 – «совместные неравномерные» режимы (12)).

$$J_{pp} = m \cdot \int_0^{1/m} F_*(\bar{\chi}_p(\alpha)) d\alpha = \frac{\beta_0}{m^0 \cdot 1} + \frac{\sum_{i=1}^m \beta_i}{m \cdot 2} + \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=i+1}^m \beta_{ij}}{m^2 \cdot 3} + \dots + \frac{\beta_{12\dots m}}{m^m \cdot (m+1)}, \quad (9)$$

$$J_{cp} = \int_0^1 F_*(\bar{\chi}_c(\alpha)) d\alpha = \frac{\beta_0}{1} + \frac{\sum_{i=1}^m \beta_i}{2} + \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=i+1}^m \beta_{ij}}{3} + \dots + \frac{\beta_{12\dots m}}{(m+1)}, \quad (10)$$

$$J_{cn} = \int_0^1 \int_0^1 \dots \int_0^1 F_*(\bar{\chi}_c(\alpha_1, \dots, \alpha_m)) d\alpha_1 d\alpha_2 \dots d\alpha_m = \frac{\beta_0}{2^0} + \frac{\sum_{i=1}^m \beta_i}{2^1} + \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=i+1}^m \beta_{ij}}{2^2} + \dots + \frac{\beta_{12\dots m}}{2^m}. \quad (11)$$

$$J_{pn} = m! \cdot \iiint_{\substack{\alpha_1 + \dots + \alpha_m \leq 1 \\ 0 \leq \alpha_i \leq 1, i=1, \dots, m}} F_*(\bar{\chi}_p(\alpha_1, \dots, \alpha_m)) d\alpha_1 d\alpha_2 \dots d\alpha_m = \\ = \frac{\beta_0}{1} + \frac{\sum_{i=1}^m \beta_i}{m+1} + \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=i+1}^m \beta_{ij}}{(m+1) \cdot (m+2)} + \dots + \frac{\beta_{12\dots m}}{(m+1) \cdot (m+2) \cdot \dots \cdot (m+m)}. \quad (12)$$

Учитывая то факт, что параметрический геном многорежимного СЛО хранит отдельные топологические свойства монотонных структур по аналогии с геномом структуры, а интенсивность и характер реализации режимов функционирования СЛО влияют на проявление этих свойств, предлагается, используя компоненты вектор-функции прямого и двойственного параметрического генома и формулу (2), определить полиномы для вычисления структурно-функциональной живучести многорежимного СЛО по формуле (13)

$$\tilde{G}_{c(p)}(\alpha_1, \dots, \alpha_m) = \frac{2k-1}{2n} + \left(1 - \frac{\eta_{c(p)k}(\alpha_1, \dots, \alpha_m)}{C_n^k} + \min\left\{1 - \frac{\eta_{c(p)k}(\alpha_1, \dots, \alpha_m)}{C_n^k}, \frac{\chi_{c(p)l}(\alpha_1, \dots, \alpha_m)}{C_n^l}\right\}\right) \cdot \frac{n-k-l+1}{2n},$$

где $\eta_{c(p)k}(\alpha_1, \dots, \alpha_m) > 0$, $\eta_{c(p)l}(\alpha_1, \dots, \alpha_m) = 0 \forall 0 < i < k$; $\chi_{c(p)l}(\alpha_1, \dots, \alpha_m) > 0$, $\chi_{c(p)j}(\alpha_1, \dots, \alpha_m) = 0 \forall 0 < j < l$. (13)

Далее используя формулы (9)-(12) можно вычислить значение показателя структурно-функциональной живучести СЛО в условиях неизвестной циклограммы реализации режимов функционирования для четырех крайних вариантов, приведенных выше.

Наконец, поясним за счет чего удается повысить оперативность вычисления приближенных значений рассматриваемых показателей. С одной стороны, зная вероятностный полином успешного функционирования многорежимного СЛО, полученный с применением ППП «Арбитр» [12], не сложно получить геном и параметрический геном структуры, причем для этого достаточно использовать векторно-матричные вычисления. С другой стороны, предложенные формулы (2) и (13), а также формулы (9)-(12) [13] оперативного определения значений интегральных показателей позволяют для их вычисления использовать также векторно-матричное представление. Векторно-матричные вычисления определяют существенное преимущество - меньший объем памяти для хранения и меньшие затраты времени на обработку, более высокая точность позиционирования при вычислении показателей, т.е. при малых затратах объема памяти достигать высокой оперативности вычисления интегральных показателей.

Пример оценивания живучести системы управления движением малого космического аппарата при неизвестной циклограмме реализации режимов ориентации

Проиллюстрируем предложенный подход на примере расчета живучести для системы управления движением малого космического (МКА) «Аист-2д» [9]. В качестве датчиков первичной информации СУД МКА «Аист-2Д» [9] привлекаются:

- одноосные измерители угловой скорости (ОИУС), 4 шт.;
- оптические солнечные датчики (ОСД), 2 шт.;
- звездные датчики (ЗД), 2 шт.;
- приборы ориентации по Земле (ПОЗ), 2 шт.

Рассматривается одна из схем ориентации осей четырех ОИУС представлена на рис. 2.

Основные функциональные вершины СФЦ [13] и их смысловая нагрузка представлены в таблице 5:

Таблица 5.

Номера вершин	Приборы, работоспособность которых отражают вершины
1, 2, 3 и 4	ОИУС1, ОИУС2, ОИУС3 и ОИУС4
5 и 6	ОСД1, ОСД2
7,8	ПОЗ1 ПОЗ2
9,10	ЗД1 ЗД2
11	потребность в режиме СКМ
12	потребность в режиме СО
13	потребность в режиме ВКИ,
14	потребность в режиме ЦО
15-34	фиктивными и описывают реальные логические взаимосвязи элементов СУД МКА

Применив программный комплекс логико–вероятностного моделирования «Арбитр» [12] , получим для СФЦ СУД МКА два вероятностных полинома

успешного его функционирования $\mathfrak{R}_c(P_1, \dots, P_{10}, \alpha_1, \dots, \alpha_4), \mathfrak{R}_p(P_1, \dots, P_{10}, \alpha_1, \dots, \alpha_4)$, где $\mathfrak{R}_c(P_1, \dots, P_{10}, \alpha_1, \dots, \alpha_4)$ - вероятностная функция проведения успешной ориентации МКА СУД для режимов, не являющихся группой несовместных событий (ГНС); $\mathfrak{R}_p(P_1, \dots, P_{10}, \alpha_1, \dots, \alpha_4)$ - вероятностная функция проведения успешной ориентации МКА СУД для режимов, представляющих ГНС; $P_i, i = \overline{1, 10}$ - вероятности безотказной работы ФЭ СУД, а $\alpha_i, i = \overline{1, 4}$ - интенсивности реализации режимов ориентации МКА.

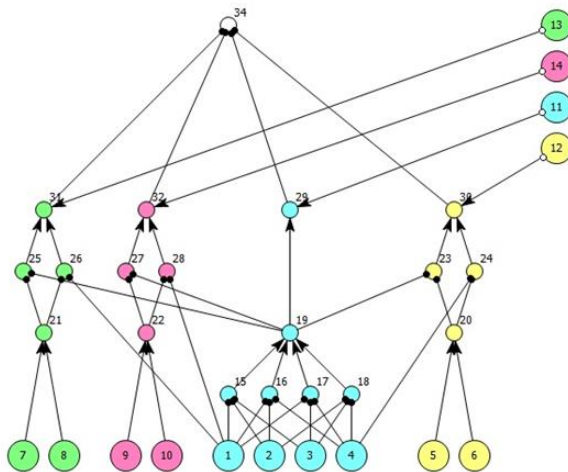


Рис. 2. СФЦ датчиков СУД для конфигурации «Куб»

Логическим критерий успешного выполнения режимов ориентации МКА является прямой выход фиктивной вершины y_{34} . Характер реализации режимов ориентации (группа совместных или несовместных событий) задается при описании СФЦ СУД МКА. После решения системы логических уравнений получаем логическую функцию успешного выполнения режимов ориентации МКА и соответствующие вероятностные полиномы успешной реализации режимов ориентации для рассматриваемых случаев. Преобразовав данные полиномы к

однородному виду, вычисляем прямой и двойственный параметрический геномы структуры.

Если режимы ориентации представляют группу несовместных событий, то параметрические геномы имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}\vec{\chi}_p(\alpha_1, \dots, \alpha_4) &= (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4, 0, 2\alpha_2 + 2\alpha_3 + 2\alpha_4, 4\alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4, \\ &-3\alpha_1 + 2\alpha_2 + 2\alpha_3 + 2\alpha_4, -3\alpha_2 - 3\alpha_3 - 3\alpha_4, \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4), \\ \vec{\eta}_p(\alpha_1, \dots, \alpha_4) &= (0, 0, 6\alpha_1 + 4\alpha_2 + 4\alpha_3 + 4\alpha_4, -8\alpha_1 - 3\alpha_2 - 3\alpha_3 - 3\alpha_4, \\ &3\alpha_1 - 2\alpha_2 - 2\alpha_3 - 2\alpha_4, 3\alpha_2 + 3\alpha_3 + 3\alpha_4, -\alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4).\end{aligned}$$

Если режимы ориентации представляют группу совместных событий, то параметрические геномы имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}\vec{\chi}_c(\alpha_1, \dots, \alpha_m) &= (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4 + \alpha_1\alpha_2 + \alpha_1\alpha_3 + \alpha_1\alpha_4 + \alpha_2\alpha_3 + \alpha_2\alpha_4 + \alpha_3\alpha_4 \\ &- \alpha_1\alpha_2\alpha_3 - \alpha_1\alpha_2\alpha_4 - \alpha_1\alpha_3\alpha_4 - \alpha_2\alpha_3\alpha_4 + \alpha_1\alpha_2\alpha_3\alpha_4, 0, 2\alpha_2 + 2\alpha_3 + 2\alpha_4 - 2\alpha_1\alpha_2 \\ &- 2\alpha_1\alpha_3 - 2\alpha_1\alpha_4 - 4\alpha_2\alpha_3 - 4\alpha_2\alpha_4 - 4\alpha_3\alpha_4 + 4\alpha_1\alpha_2\alpha_3 + 4\alpha_1\alpha_2\alpha_4 + 4\alpha_1\alpha_3\alpha_4 \\ &+ 6\alpha_2\alpha_3\alpha_4 - 6\alpha_1\alpha_2\alpha_3\alpha_4, 4\alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4 - 3\alpha_1\alpha_2 - 3\alpha_1\alpha_3 - 3\alpha_1\alpha_4 + 2\alpha_2\alpha_3 \\ &+ 2\alpha_2\alpha_4 + 6\alpha_3\alpha_4 + 2\alpha_1\alpha_2\alpha_3 + 2\alpha_1\alpha_2\alpha_4 - 2\alpha_1\alpha_3\alpha_4 - 7\alpha_2\alpha_3\alpha_4 + 3\alpha_1\alpha_2\alpha_3\alpha_4, \\ &-3\alpha_1 + 2\alpha_2 + 2\alpha_3 + 2\alpha_4 + 9\alpha_1\alpha_2 + 9\alpha_1\alpha_3 + 9\alpha_1\alpha_4 - 8\alpha_3\alpha_4 - 19\alpha_1\alpha_2\alpha_3 - 19\alpha_1\alpha_2\alpha_4 \\ &- 11\alpha_1\alpha_3\alpha_4 + 2\alpha_2\alpha_3\alpha_4 + 25\alpha_1\alpha_2\alpha_3\alpha_4, -3\alpha_2 - 3\alpha_3 - 3\alpha_4 - 7\alpha_1\alpha_2 - 7\alpha_1\alpha_3 - 7\alpha_1\alpha_4 \\ &+ 10\alpha_2\alpha_3 + 10\alpha_2\alpha_4 + 11\alpha_3\alpha_4 + 26\alpha_1\alpha_2\alpha_3 + 26\alpha_1\alpha_2\alpha_4 + 25\alpha_1\alpha_3\alpha_4 - 14\alpha_2\alpha_3\alpha_4 \\ &- 64\alpha_1\alpha_2\alpha_3\alpha_4, \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 + 2\alpha_1\alpha_2 + 2\alpha_1\alpha_3 + 2\alpha_1\alpha_4 - 17\alpha_2\alpha_3 - 17\alpha_2\alpha_4 - 10\alpha_3\alpha_4 \\ &- 17\alpha_1\alpha_2\alpha_3 - 17\alpha_1\alpha_2\alpha_4 - 24\alpha_1\alpha_3\alpha_4 + 45\alpha_2\alpha_3\alpha_4 + 80\alpha_1\alpha_2\alpha_3\alpha_4, 10\alpha_2\alpha_3 + 10\alpha_2\alpha_4 \\ &+ 5\alpha_3\alpha_4 + 6\alpha_1\alpha_2\alpha_3 + 6\alpha_1\alpha_2\alpha_4 + 11\alpha_1\alpha_3\alpha_4 - 59\alpha_2\alpha_3\alpha_4 - 61\alpha_1\alpha_2\alpha_3\alpha_4, -2\alpha_2\alpha_3 \\ &- 2\alpha_2\alpha_4 - \alpha_3\alpha_4 - \alpha_1\alpha_2\alpha_3 - \alpha_1\alpha_2\alpha_4 - 2\alpha_1\alpha_3\alpha_4 + 40\alpha_2\alpha_3\alpha_4 + 29\alpha_1\alpha_2\alpha_3\alpha_4, \\ &-14\alpha_2\alpha_3\alpha_4 - 8\alpha_1\alpha_2\alpha_3\alpha_4, 2\alpha_2\alpha_3\alpha_4 + \alpha_1\alpha_2\alpha_3\alpha_4),\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{\eta}_c(\alpha_1, \dots, \alpha_m) = & (0, 0, 6\alpha_1 + 4\alpha_2 + 4\alpha_3 + 4\alpha_4 - 3\alpha_1\alpha_2 - 3\alpha_1\alpha_3 - 3\alpha_1\alpha_4 - \alpha_2\alpha_3 - \alpha_2\alpha_4 - 3\alpha_3\alpha_4 \\ & + \alpha_1\alpha_2\alpha_3 + \alpha_1\alpha_2\alpha_4 + 3\alpha_1\alpha_3\alpha_4 + \alpha_2\alpha_3\alpha_4 - \alpha_1\alpha_2\alpha_3\alpha_4, -8\alpha_1 - 3\alpha_2 - 3\alpha_3 - 3\alpha_4 + 3\alpha_1\alpha_2 + 3\alpha_1\alpha_3 \\ & + 3\alpha_1\alpha_4 + 3\alpha_3\alpha_4 - 3\alpha_1\alpha_3\alpha_4, 3\alpha_1 - 2\alpha_2 - 2\alpha_3 - 2\alpha_4 - 4\alpha_1\alpha_2 - 4\alpha_1\alpha_3 - 4\alpha_1\alpha_4 - 5\alpha_2\alpha_3 - 5\alpha_2\alpha_4 \\ & - 2\alpha_3\alpha_4 + 4\alpha_1\alpha_2\alpha_3 + 4\alpha_1\alpha_2\alpha_4 + 1\alpha_1\alpha_3\alpha_4 + 2\alpha_2\alpha_3\alpha_4 - 2\alpha_1\alpha_2\alpha_3\alpha_4, 3\alpha_2 + 3\alpha_3 + 3\alpha_4 + 5\alpha_1\alpha_2 \\ & + 5\alpha_1\alpha_3 + 5\alpha_1\alpha_4 + 6\alpha_2\alpha_3 + 6\alpha_2\alpha_4 - 6\alpha_1\alpha_2\alpha_3 - 6\alpha_1\alpha_2\alpha_4 - 3\alpha_2\alpha_3\alpha_4 + 3\alpha_1\alpha_2\alpha_3\alpha_4, -\alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4 \\ & - 2\alpha_1\alpha_2 - 2\alpha_1\alpha_3 - 2\alpha_1\alpha_4 + 3\alpha_2\alpha_3 + 3\alpha_2\alpha_4 + 3\alpha_3\alpha_4 + 3\alpha_1\alpha_2\alpha_3 + 3\alpha_1\alpha_2\alpha_4 + 3\alpha_1\alpha_3\alpha_4 + 4\alpha_2\alpha_3\alpha_4 \\ & - 3\alpha_1\alpha_2\alpha_3\alpha_4, -6\alpha_2\alpha_3 - 6\alpha_2\alpha_4 - 3\alpha_3\alpha_4 - 2\alpha_1\alpha_2\alpha_3 - 2\alpha_1\alpha_2\alpha_4 - 5\alpha_1\alpha_3\alpha_4 - 3\alpha_2\alpha_3\alpha_4 + 3\alpha_1\alpha_2\alpha_3\alpha_4, \\ & 2\alpha_2\alpha_3 + 2\alpha_2\alpha_4 + \alpha_3\alpha_4 + \alpha_1\alpha_2\alpha_3 + \alpha_1\alpha_2\alpha_4 + 2\alpha_1\alpha_3\alpha_4 - 4\alpha_2\alpha_3\alpha_4 - 2\alpha_1\alpha_2\alpha_3\alpha_4, \\ & 6\alpha_2\alpha_3\alpha_4 + 2\alpha_1\alpha_2\alpha_3\alpha_4, -2\alpha_2\alpha_3\alpha_4 - \alpha_1\alpha_2\alpha_3\alpha_4). \end{aligned}$$

Расчет приблизительной оценки показателя структурно-функциональной живучести СУД МКА необходимо воспользоваться формулами (9)-(13).

При вычислении значения показателя структурно-функциональной живучести для случая несовместных событий, используя параметрический геном $\bar{\chi}_p(\alpha_1, \dots, \alpha_4)$ и его двойственный аналог $\bar{\eta}_p(\alpha_1, \dots, \alpha_4)$, определим необходимые исходные данные $k = 2$, $\eta_{(p)k}(\alpha_1, \dots, \alpha_4) = 6\alpha_1 + 4\alpha_2 + 4\alpha_3 + 4\alpha_4$, $l = 2$, $\chi_{(p)l}(\alpha_1, \dots, \alpha_4) = 2\alpha_2 + 2\alpha_3 + 2\alpha_4$, $n = 6$. Тогда полином для вычисления значений **показателя структурно-функциональной живучести СУД МКА** в этом случае примет следующий вид

$$\tilde{G}_p(\alpha_1, \dots, \alpha_m) = \frac{3}{20} + \left(1 - \frac{6\alpha_1 + 4\alpha_2 + 4\alpha_3 + 4\alpha_4}{45} + \min\left\{1 - \frac{6\alpha_1 + 4\alpha_2 + 4\alpha_3 + 4\alpha_4}{45}, \frac{2\alpha_2 + 2\alpha_3 + 2\alpha_4}{45}\right\}\right) \cdot \frac{7}{20}.$$

В случае совместных событий исходные данные для вычисления значений показателя структурно-функциональной живучести следующие:

$$\begin{aligned} k = 2, \eta_{(c)k}(\alpha_1, \dots, \alpha_4) = & 6\alpha_1 + 4\alpha_2 + 4\alpha_3 + 4\alpha_4 - 3\alpha_1\alpha_2 - 3\alpha_1\alpha_3 - 3\alpha_1\alpha_4 - \alpha_2\alpha_3 - \alpha_2\alpha_4 - 3\alpha_3\alpha_4 \\ & + \alpha_1\alpha_2\alpha_3 + \alpha_1\alpha_2\alpha_4 + 3\alpha_1\alpha_3\alpha_4 + \alpha_2\alpha_3\alpha_4 - \alpha_1\alpha_2\alpha_3\alpha_4, l = 2, \chi_{(c)l}(\alpha_1, \dots, \alpha_4) = 2\alpha_2 + 2\alpha_3 + 2\alpha_4 - 2\alpha_1\alpha_2 \\ & - 2\alpha_1\alpha_3 - 2\alpha_1\alpha_4 - 4\alpha_2\alpha_3 - 4\alpha_2\alpha_4 - 4\alpha_3\alpha_4 + 4\alpha_1\alpha_2\alpha_3 + 4\alpha_1\alpha_2\alpha_4 + 4\alpha_1\alpha_3\alpha_4 \\ & + 6\alpha_2\alpha_3\alpha_4 - 6\alpha_1\alpha_2\alpha_3\alpha_4, n = 10, \end{aligned}$$

$$\tilde{G}_c(\alpha_1, \dots, \alpha_m) = \frac{3}{20} + \left(1 - \frac{(\alpha_1 + 4\alpha_2 + 4\alpha_3 + 4\alpha_4 - 3\alpha_1\alpha_2 - 3\alpha_1\alpha_3 - 3\alpha_1\alpha_4 - \alpha_2\alpha_3 - \alpha_2\alpha_4 - 3\alpha_3\alpha_4 + \alpha_1\alpha_2\alpha_3 + \alpha_1\alpha_2\alpha_4 + 3\alpha_1\alpha_3\alpha_4 + \alpha_2\alpha_3\alpha_4 - \alpha_1\alpha_2\alpha_3\alpha_4)}{45}\right) +$$

$$\min\left\{1 - \frac{(\alpha_1 + 4\alpha_2 + 4\alpha_3 + 4\alpha_4 - 3\alpha_1\alpha_2 - 3\alpha_1\alpha_3 - 3\alpha_1\alpha_4 - \alpha_2\alpha_3 - \alpha_2\alpha_4 - 3\alpha_3\alpha_4 + \alpha_1\alpha_2\alpha_3 + \alpha_1\alpha_2\alpha_4 + 3\alpha_1\alpha_3\alpha_4 + \alpha_2\alpha_3\alpha_4 - \alpha_1\alpha_2\alpha_3\alpha_4)}{45}, \right.$$

$$\left. \frac{(2\alpha_2 + 2\alpha_3 + 2\alpha_4 - 2\alpha_1\alpha_2 - 2\alpha_1\alpha_3 - 2\alpha_1\alpha_4 - 4\alpha_2\alpha_3 - 4\alpha_2\alpha_4 - 4\alpha_3\alpha_4 + 4\alpha_1\alpha_2\alpha_3 + 4\alpha_1\alpha_2\alpha_4 + 4\alpha_1\alpha_3\alpha_4 + 6\alpha_2\alpha_3\alpha_4 - 6\alpha_1\alpha_2\alpha_3\alpha_4)}{45}\right\} \cdot \frac{7}{20}.$$

В результате проведенных вычислений получены следующие приближенные оценки показателей структурно-функциональной живучести СУД МКА в условиях неизвестной циклограммы реализации режимов ориентации. Так, если режимы ориентации представляют группу совместных событий с равномерной интенсивностью, то значение показателя структурно-функциональной живучести СУД МКА будет равна 0,459, а при неравномерной интенсивности реализации режимов значение показателя составило 0,455. Для несовместной группы событий значения показателя структурно-функциональной живучести соответственно равны 0,475 и 0,46.

Далее приведем результаты исследования вопроса о влиянии отказа тех или иных ФЭ СУД МКА на значение показателя структурно-функциональной живучести системы в условиях неизвестной циклограммы реализации режимов ориентации. В случае выхода из строя одного из двух оптических солнечных датчиков (ОСД1), которые принимают участие при реализации только режима солнечной ориентации и не столь критичны для остальных режимов функционирования СУД МКА, значения рассматриваемых в статье показателей структурно-функциональной живучести будут соответственно равны для группы совместных событий 0,4255; 0,4262, а для несовместных - 0,4236; 0,4278. В этих условиях живучесть СУД МКА уменьшится

на 3-5%. Если же откажет один из одноосных измерителей угловой скорости (ОИУС1), которые участвуют при проведении всех режимов ориентации МКА, то соответствующие показатели примут значения 0,3463 и 0,3297, 0,3325 и 0,292, т.е. живучесть уменьшится на 12-16%.

Кроме того, исследование приближенной оценки показателя структурно-функциональной живучести СУД МКА при выполнении каждого отдельно взятого режима ориентации с использованием концепции генома структуры и формулы (2) дали следующие результаты. Геном и двойственный геном структуры при выполнении режима СКМ (сброс кинетического момента) представляют собой соответственно вектора $\chi = (0, 0, 6, -8, 3), \eta = (0, 0, 0, 4, -3)$. Исходными данными для вычисления приближенной оценки показателя живучести СУД МКА при выполнении этого режима являются $k = 2, \chi_k = 6, l = 3, \eta_l = 4, n = 4$. Результат вычисления приближенной оценки показателя живучести СУД МКА составил $\tilde{G}_{СКМ} = 0,375$. При реализации второго режима СО (солнечная ориентация), третьего режима ВКИ (выдача корректирующего импульса) и четвертого режима ЦО (целевая ориентация) геном и двойственный геном имеют вид $\chi = (0, 0, 4, -3, -2, 3, -1), \eta = (0, 0, 2, -1, 2, -3, 1)$. Исходные данные $k = 2, \chi_k = 4, l = 2, \eta_l = 2, n = 6$, а результат вычислений - $\tilde{G}_{СО} = \tilde{G}_{ВКИ} = \tilde{G}_{ЦО} = 0,467$.

Полученные результаты можно обосновать следующими соображениями. ОИУС привлекаются к работе в режиме СКМ по принципу «3 из 4», а в остальных режимах ОИУС привлекаются параллельно с дублированными солнечными

датчиками либо звездными датчиками, либо приборами ориентации по Земле. Последние схемы подключения обладают большей структурной живучестью.

Заключение

Новизна предложенного подхода в том, что на единой методологической основе (оригинальная концепция параметрического генома структуры многорежимного сложного объекта) возможно проводить исследование свойств структурно-функциональной надежности и живучести как монотонных, так и немонотонных, как однородных, так и неоднородных структур СЛО при неизвестной циклограмме реализации режимов функционирования.

Введены новые интегральные показатели структурно-функциональной надежности, а также формула оперативного приближенного расчета значений структурно-функциональной живучести для многорежимных объектов. Предложенные показатели структурно-функциональной надежности и живучести многорежимных объектов позволят проанализировать и оценить свойства надежности и живучести того или иного варианта конфигураций при деградации системы.

Список источников

1. Павлов А.Н., Павлов Д.А., Воротягин В.Н. Подход к оцениванию живучести транспортно-логистических систем // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2020. № 1 (21). С. 32-39.

2. Черкесов Г.Н., Недосекин А.О. Описание подхода к оценке живучести сложных структур при многоразовых воздействиях высокой точности // Надежность. 2016. Т. 16. № 2 (57). С. 3-15.
3. Бородин В.В. Оценка надежности обслуживаемых устройств орбитальной космической станции // Труды МАИ. 2012. № 58. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=33036>
4. Черкесов Г.Н., Недосекин А.О., Виноградов В.В. Анализ функциональной живучести структурно-сложных технических систем // Надежность. 2018. Т. 18. № 2. С. 17-24.
5. Павлов А.Н., Гончаров А.М., Воротягин В.Н. Методология гиперграфового моделирования структурно-технологических возможностей бортовых систем малых космических аппаратов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, 2020. № 673. С. 7-17.
6. Быков А.П., Пиганов М.Н. Прогнозирование показателей качества бортовых радиоэлектронных устройств // Труды МАИ. 2021. № 116. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=121012>. DOI: [10.34759/trd-2021-116-05](https://doi.org/10.34759/trd-2021-116-05)
7. Васильков Ю.В., Тимошенко А.В., Советов В.А., Кирмель А.С. Методика оценки функциональных характеристик систем радиомониторинга при ограниченных данных о параметрах надежности // Труды МАИ. 2019. № 108. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=109557>. DOI: [10.34759/trd-2019-108-16](https://doi.org/10.34759/trd-2019-108-16)
8. Кини Р.Л., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. – М.: Радио и связь, 1981. – 560 с.

9. Кирилин А.Н., Ахметов Р.Н., Шахматов Е.В. и др. Опытнo-технологический малый космический аппарат «АИСТ-2Д»: монография. – Самара: СамНЦ РАН, 2017. – 324 с.
10. Ковтун В.С. Применение методик вариабельного управления полётом автоматических космических аппаратов для рационального использования ресурсов бортовых систем // Космонавтика и ракетостроение. 2017. № 4(97). С. 143-157.
11. Мануйлов Ю.С., Калинин В.Н., Гончаревский В.С. и др. Управление космическими аппаратами и средствами наземного комплекса управления. – СПб: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2010. – 609 с.
12. Поленин В.И., Рябинин И.А., Свиpин С.К., Гладкова И.А. Применение общего логико–вероятностного метода для анализа технических, военных организационно–функциональных систем и вооруженного противоборства: монография. – СПб: СПб РАЕН, 2011. – 416 с.
13. Павлов А.Н., Павлов Д.А., Умаров А.Б., Гордеев А.В. Метод структурно-параметрического синтеза конфигураций многорежимного объекта // Информатика и автоматизация. 2022. Т. 21. № 4. С. 812-845. DOI: [10.15622/ia.21.4.7](https://doi.org/10.15622/ia.21.4.7)
14. Павлов А.Н., Слинъко А.А., Воротягин В.Н. Методика оценивания структурно-функциональной живучести бортовых систем малых космических аппаратов в условиях возникновения нерасчетных полетных ситуаций // Информация и Космос. 2019. № 2. С. 139-147.
15. Акимов Е.В., Кузнецов М.Н. Вероятностные математические модели для оценки надежности беспроводных сенсорных сетей // Труды МАИ. 2010. № 40. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=22873>

16. Алешин Е.Н., Зиновьев С.В., Копкин Е.В. и др. Системный анализ организационно-технических систем космического назначения. – СПб: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2018. – 370 с.
17. Черкесов Г.Н., Недосекин А.О., Виноградов В.В. Анализ функциональной живучести структурно-сложных технических систем // Надежность. 2018. Т. 18. № 2. С. 17-24.
18. Павлов А.Н., Павлов Д.А., Алешин Е.Н. и др. Моделирование и анализ структурно-функциональной надежности сложных многорежимных объектов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2021. № 677. С. 186-194.
19. Шубинский И.Б. Функциональная надежность информационных систем. Методы анализа. – М.: Изд-во «Журнал Надежность», 2012. – 297 с
20. Шубинский И.Б. Надежные отказоустойчивые информационные системы. Методы синтеза. – М.: Изд-во «Журнал Надежность», 2016. – 544 с.

References

1. Pavlov A.N., Pavlov D.A., Vorotyagin V.N. // *Intellectual'nye tekhnologii na transporte*, 2020, no. 1 (21), pp. 32-39.
2. Cherkesov G.N., Nedosekin A.O. *Nadezhnost'*, 2016, vol. 16, no. 2 (57), pp. 3-15.
3. Borodin V.V. *Trudy MAI*, 2012, no. 58. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=33036>

4. Cherkesov G.N., Nedosekin A.O., Vinogradov V.V. *Nadezhnost'*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 17-24.
5. Pavlov A.N., Goncharov A.M., Vorotyagin V.N. *Trudy Voенno-kosmicheskoi akademii imeni A.F. Mozhaiskogo*, 2020, no. 673, pp. 7-17.
6. Bykov A.P., Piganov M.N. *Trudy MAI*, 2021, no 116. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=121012>. DOI: [10.34759/trd-2021-116-05](https://doi.org/10.34759/trd-2021-116-05)
7. Vasil'kov Yu.V., Timoshenko A.V., Sovetov V.A., Kirmel' A.S. *Trudy MAI*, 2019, no. 108. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=109557>. DOI: [10.34759/trd-2019-108-16](https://doi.org/10.34759/trd-2019-108-16)
8. Kini R.L., Raifa Kh. *Prinyatie reshenii pri mnogikh kriteriyakh: predpochteniya i zameshcheniya* (Decision-making under many criteria: preferences and substitutions), Moscow, Radio i svyaz', 1981, 560 p.
9. Kirilin A.N., Akhmetov R.N., Shakhmatov E.V. et al. *Opytno-tekhnologicheskii maliy kosmicheskii apparat «AIST-2D»* (Experimental and technological small spacecraft "AIST-2D": monograph), Samara, SamNTs RAN, 2017, 324 p.
10. Kovtun V.S. *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2017, no. 4(97), pp. 143-157.
11. Manuilov Yu.S., Kalinin V.N., Goncharevskii V.S. et al. *Upravlenie kosmicheskimi apparatami i sredstvami nazemnogo kompleksa upravleniya* (Control of spacecraft and ground control complex facilities.), Saint Petersburg, VKA imeni A.F. Mozhaiskogo, 2010, 609 p.
12. Polenin V.I., Ryabinin I.A., Svirin S.K., Gladkova I.A. *Primenenie obshchego logiko-veroyatnostnogo metoda dlya analiza tekhnicheskikh, voennykh organizatsionno-funktional'nykh sistem i vooruzhennogo protivoborstva* (Application of the general logical-

probabilistic method for the analysis of technical, military organizational and functional systems and armed confrontation: monograph), Saint Petersburg, SPb RAEN, 2011, 416 p.

13. Pavlov A.N., Pavlov D.A., Umarov A.B., Gordeev A.V. *Informatika i avtomatizatsiya*, 2022, vol. 21, no. 4, pp. 812-845. DOI: [10.15622/ia.21.4.7](https://doi.org/10.15622/ia.21.4.7)

14. Pavlov A.N., Slin'ko A.A., Vorotyagin V.N. *Informatsiya i Kosmos*, 2019, no. 2, pp. 139-147.

15. Akimov E.V., Kuznetsov M.N. *Trudy MAI*, 2010, no. 40. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=22873>

16. Aleshin E.N., Zinov'ev S.V., Kopkin E.V. et al. *Sistemnyi analiz organizatsionno-tekhnicheskikh sistem kosmicheskogo naznacheniya* (System analysis of organizational and technical systems for space purposes), Saint Petersburg, VKA imeni A.F. Mozhaiskogo, 2018, 370 p.

17. Cherkesov G.N., Nedosekin A.O., Vinogradov V.V. *Nadezhnost'*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 17-24.

18. Pavlov A.N., Pavlov D.A., Aleshin E.N. et al. *Trudy Voенno-kosmicheskoi akademii imeni A.F. Mozhaiskogo*, 2021, no. 677, pp. 186-194.

19. Shubinskii I.B. *Funktsional'naya nadezhnost' informatsionnykh sistem. Metody analiza* (Functional reliability of information systems. Methods of analysis), Moscow, Izd-vo «Zhurnal Nadezhnost'», 2012, 297 p.

20. Shubinskii I.B. *Nadezhnye otkazoustoichivye informatsionnye sistemy. Metody sinteza* (Reliable fault-tolerant information systems. Methods of synthesis), Moscow, Izd-vo «Zhurnal Nadezhnost'», 2016, 544 p.

Статья поступила в редакцию 18.09.2023

Одобрена после рецензирования 25.09.2023

Принята к публикации 27.10.2023

The article was submitted on 18.09.2023; approved after reviewing on 25.09.2023; accepted for publication on 27.10.2023