

Методика оценивания структурно-функциональной живучести бортовых систем малых космических аппаратов в условиях возникновения нерасчетных полетных ситуаций

Technique of evaluation of structural and functional survivability of on-board systems of small spacecraft under conditions of the off-design flight situations occurred

Павлов / Pavlov A.

Александр Николаевич
(Pavlov62@list.ru)

доктор технических наук, профессор.
ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского» МО РФ (ВКА имени А. Ф. Можайского), профессор кафедры.
г. Санкт-Петербург

Слинько / Slinko A.

Алексей Алексеевич
(thebestman_leshka@mail.ru)

кандидат технических наук.
ВКА имени А. Ф. Можайского, научный сотрудник.
г. Санкт-Петербург

Воротягин / Vorotyagin V.

Валентин Николаевич
(Vorotyagin@rambler.ru)

ВКА имени А. Ф. Можайского, начальник курса.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: малый космический аппарат – small spacecraft; структурно-функциональная живучесть – structural and functional survivability; расчетные нештатные ситуации – design emergency situation; геном структуры – structure genome; система управления движением – traffic control system; схема функциональной целостности – scheme of functional integrity.

Анализ современных методов оценивания живучести бортовых систем малых космических аппаратов при управлении их конфигурацией и реконфигурацией в условиях возникновения расчетных аварийных ситуаций показал, что при наличии нерасчетных нештатных ситуаций при проектировании и создании аппаратов, отличающихся по конструкции и составу бортовых систем от известных, указанные подходы неприемлемы. Это требует разработки новых методологических и методических основ обеспечения структурно-функциональной живучести бортовых систем малых космических аппаратов, чему и посвящена данная статья.

The analysis of modern methods for evaluating the survivability of the on-board systems of small spacecraft in the management of their configuration and reconfiguration under conditions of the design emergency situations showed that in the presence of off-design emergency situations, design and creation of spacecraft that differ in structure and composition of on-board systems from the known ones, these approaches are unacceptable. This requires the development of new methodological and methodical bases to provide the structural and functional survivability of the on-board systems of small spacecraft, which is the subject of this article.

Введение

В рамках реализации Федеральной космической программы России на 2016–2025 годы проводятся работы по созданию и наращиванию орбитальных группировок малых космических аппаратов (МКА) различного назначения. Актуальной задачей является обеспечение требуемого уровня эффективности таких группировок и их долговечности. При этом расширение круга функциональных задач, решаемых современными МКА, и увеличение сроков их активного существования возможно путем обеспечения эффективного и качественного функционирования их БС как в номинальных условиях работы, так и при возникновении расчетных и нерасчетных нештатных ситуаций. Обеспечить выполнение целевых функций МКА при возникновении нештатных полетных ситуаций возможно путем обеспечения живучести БС МКА. Как правило, методология управления многочисленными группировками МКА реализуется через множество управлений, использующих структурные внутренние резервы, построенные на избыточности ресурсов отдельных систем. В основе организации такого управления лежит концепция повышения надёжности работы БС МКА за счёт обеспечения свойств безотказности, сохраняемости, долговечности и ремонтпригодности в номинальных условиях эксплуатации и расчетных нештатных ситуациях.

Причем свойство живучести БС МКА напрямую связано со свойством надёжности работы отдельных

систем КА, однако имеет более широкое толкование. Живучесть БС МКА [1], как это принято для сложных технических систем, характеризуется совокупностью частных свойств, основными из которых являются: неуязвимость, адаптивность, восстанавливаемость.

Неуязвимость МКА определяется стойкостью его БС, а их влияние на состояние работоспособности МКА зависит от степени структурной избыточности БС. Адаптивность отражает мероприятия, обеспечивающие свойство адаптации БС к отказам компонентов. Сущность этих мероприятий состоит в формировании необходимой и достаточной избыточности в составе каждой БС исходя из действующих ограничений, а также с учётом выбранной топологии. Восстанавливаемость характеризует приспособленность БС к восстановлению (реанимации) МКА для целевого функционирования за счёт внутренних ресурсов в течение времени, которое допустимо по условиям программы полета.

Под состоянием БС МКА на конкретном этапе его полета понимается заданная совокупность характеристик, отражающих с определённой точки зрения в каждый рассматриваемый момент времени наиболее существенные стороны функционирования БС МКА. Качество функционирования БС МКА характеризуется векторным показателем качества функционирования МКА. К таким целевым показателям, к примеру, МКА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) можно отнести: линейное разрешение на местности; оперативность получения целевой информации; производительность в номинальных условиях функционирования; длительность активного существования. При этом на реальные показатели существенное влияние оказывают частичные отказы функциональных элементов (ФЭ) БС. При возникновении расчетных нештатных ситуаций или «нормальных» условий полёта для оценивания живучести БС МКА, как правило, применяют подход, основанный на использовании так называемых байпасов [1, 2, 3].

Производится имитация орбитального движения МКА и его функционирования по целевому назначению. Организуется также имитация отказов элементов целевой аппаратуры и БС в зависимости от моделируемого уровня надёжности. Для каждого момента времени имитации производится проверка работоспособности целевой аппаратуры и БС. В случае отказа оценивается случайное время вынужденных перерывов в работе той или иной БС, значения целевых показателей. Расчёт прекращается при отказах МКА, при которых невозможно дальнейшее функционирование по целевому назначению, либо при достижении времени, равному сроку активного существования. Такого рода расчёты проводятся для различных уровней надёжности расчетных нештатных ситуаций. На каждом уровне производится заданное количество статистических испытаний или такое количество, которое обеспечивает заданную точность моделиро-

вания. Рассчитанные значения показателей откладываются на лучевой диаграмме (Кивиата). Для определения показателя живучести БС МКА осуществляется сравнение площади фигуры на диаграмме с площадями фигур, отражающих исходные и предельно допустимые значения целевых показателей. Если хотя бы один из целевых показателей оказывается меньше допустимого значения, то это соответствует потере живучести МКА, что требует принятия решения о характере дальнейшего функционирования МКА.

Однако проблема указанного подхода состоит в том, что в настоящее время такие зависимости получают лишь по результатам эксплуатации уже созданных КА. При проектировании новых МКА используются результаты статистических обработок, предшествовавших или эксплуатирующихся МКА. Это допустимо при создании аналогичных по конструкции и составу БС МКА. Но если разрабатываемый МКА существенно отличается от ранее созданных, то такой подход не всегда приемлем.

Кроме расчетных нештатных ситуаций бывают нерасчетные, которые никто заранее не может предвидеть. И, что немаловажно, в реальном полете эти нерасчетные нештатные ситуации проявляются соизмеримо с расчетными. В этих условиях модели и методы, применяемые в теории надежности, становятся неприменимы для обеспечения живучести БС МКА, что требует разработки концептуально нового подхода к обеспечению живучести БС МКА.

Подход к анализу структурной живучести БС МКА

В рамках исследований, посвященных разработке методологических и методических основ обеспечения живучести БС МКА, требуется проведение анализа такого важного свойства МКА как структурная живучесть. В широком смысле под структурной живучестью МКА понимается его способность сохранять в определенных пределах качество своего целевого функционирования (или восстанавливать такую способность) путем изменения (формирования) соответствующих структур (конфигураций).

Смена структурных состояний БС МКА связана как с отказами ФЭ БС, так и выполнением программы полета. Отказавшим (неработоспособным) будем считать ФЭ МКА, который не способен выполнить все возложенные на него технологические операции. ФЭ будет считаться частично работоспособным при возможности выполнения им хотя бы одной из возложенных технологических операций. Очевидно, что значения частных показателей качества функционирования БС МКА в каждом состоянии зависят от: множества отказавших, работоспособных, частично работоспособных ФЭ; распределения технологических операций; перераспределения этих операций между работоспособными или частично работоспособными ФЭ.

Важным и неотъемлемым условием изучения возможностей БС МКА [4–8] является проведение анализа и оценивания архитектуры его структурных состояний, отражающих как функциональные, так и технологические особенности управления МКА. Для анализа свойства структурной живучести БС МКА, а также для синтеза системы, обладающей требуемым свойством структурной живучести, необходимо ввести количественную оценку, адекватно отражающую рассматриваемое свойство.

При исследовании структурной живучести БС МКА согласно подхода, предложенного в [8], вводится понятие обобщенного отказа (ОО) i -ой кратности, при котором рассматриваются структурные состояния БС МКА, образующиеся 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 БС МКА). Среди множества структурных состояний для данного ОО определяется множество работоспособных состояний, мощность которого обозначим R_i , или множество неработоспособных состояний, мощность которого обозначим N_i ($R_i + N_i = C_n^i$).

Для сравнения различных структур определяется относительная функция структурной живучести БС МКА

$$\Psi(i/n) \quad \Psi(i) = G_i = \frac{R_i}{C_n^i} = 1 - \frac{N_i}{C_n^i},$$

производится ее линейная интерполяция кусочно-линейной функцией $\tilde{\Psi}(x), x \in [0, 1]$ и вводится интегральный показатель структурной живучести БС МКА в виде следующего функционала $F_g = \int_0^1 \tilde{\Psi}(x) dx$.

Будем считать, что БС МКА находится в неработоспособном структурном состоянии, если при ОО удалены все элементы, входящие, по крайней мере, хотя бы в одно из минимальных сечений отказов структуры БС МКА. Возможные варианты наличия в структуре БС МКА минимальных сечений отказов приведены ниже.

Вариант 1: структура БС МКА характеризуется k минимальными сечениями отказов, каждый из которых состоит из m элементов. Причем сечения отказов не имеют общих элементов. В этом случае функция структурной живучести при ОО i -ой кратности можно вычислить [8] по формуле (1)

$$\Psi(i) = 1 - \frac{N_i}{C_n^i} = 1 - \frac{\sum_{j=1}^{\min\left\{\frac{i}{m}, k\right\}} (-1)^{j-1} C_k^j C_{n-jm}^{i-jm}}{C_n^i}, \quad (1)$$

где $\left\lfloor \frac{i}{m} \right\rfloor$ – целая часть отказавших минимальных сечений при данном ОО.

Вариант 2: структура БС МКА характеризуется k минимальными сечениями отказов, каждый из которых состоит из $m_j (j=1, \dots, k)$ элементов. Причем сечения отказов не имеют общих элементов (дизъ-

юнктное множество минимальных сечений отказов). Тогда число неработоспособных структурных состояний при ОО i -ой кратности примет следующий вид (2) [8]:

$$N_i = \sum_{j=1}^k \delta(i - m_j) C_{n-m_j}^{i-m_j} - \sum_{j_1=1}^k \sum_{j_2 > j_1}^k \delta(i - m_{j_1} - m_{j_2}) C_{n-m_{j_1}-m_{j_2}}^{i-m_{j_1}-m_{j_2}} + \dots + \sum_{j_1=1}^k \sum_{j_2 > j_1}^k \sum_{j_3 > j_2}^k \delta(i - m_{j_1} - m_{j_2} - m_{j_3}) C_{n-m_{j_1}-m_{j_2}-m_{j_3}}^{i-m_{j_1}-m_{j_2}-m_{j_3}} - \dots + \dots - (-1)^{k-1} \delta(i - m_{j_1} - m_{j_2} - \dots - m_{j_k}) C_{n-m_{j_1}-m_{j_2}-\dots-m_{j_k}}^{i-m_{j_1}-m_{j_2}-\dots-m_{j_k}} \quad (2)$$

где $\delta(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$ – дискретная функция Хэвисайда.

При условии $m_1 = m_2 = \dots = m_k = m$ формула (2) преобразуется в формулу (1).

Вариант 3: структура БС МКА характеризуется k минимальными сечениями отказов, каждый из которых состоит из $m_j (j=1, \dots, k)$ элементов. Причем сечения отказов имеют общие элементы.

В данной ситуации число неработоспособных структурных состояний при ОО i -ой кратности примет следующий вид [8]:

$$N_i = \sum_{j=1}^k \delta(i - m_j) C_{n-m_j}^{i-m_j} - \sum_{j_1=1}^k \sum_{j_2 > j_1}^k \delta(i - m_{j_1} - m_{j_2} + m_{j_1 j_2}) C_{n-m_{j_1}-m_{j_2}+m_{j_1 j_2}}^{i-m_{j_1}-m_{j_2}+m_{j_1 j_2}} + \dots + \sum_{j_1=1}^k \sum_{j_2 > j_1}^k \sum_{j_3 > j_2}^k \delta(i - m_{j_1} - m_{j_2} - m_{j_3} + m_{j_1 j_2 j_3}) C_{n-m_{j_1}-m_{j_2}-m_{j_3}+m_{j_1 j_2 j_3}}^{i-m_{j_1}-m_{j_2}-m_{j_3}+m_{j_1 j_2 j_3}} - \dots + \dots - (-1)^{k-1} \delta(i - m_{j_1} - m_{j_2} - \dots - m_{j_k} + m_{j_1 j_2 \dots j_k}) C_{n-m_{j_1}-m_{j_2}-\dots-m_{j_k}+m_{j_1 j_2 \dots j_k}}^{i-m_{j_1}-m_{j_2}-\dots-m_{j_k}+m_{j_1 j_2 \dots j_k}} \quad (3)$$

В формуле (3) величины $m_{j_1 j_2 \dots j_k}$ представляют собой суммарное число общих элементов в минимальных сечениях отказов с номерами j_1, j_2, \dots, j_k .

Используя формулы (1–3), можно вычислить относительную функцию структурной живучести БС МКА, имеющих монотонную структуру, и соответственно определить интегральный показатель структурной живучести системы $F_g = \int_0^1 \tilde{\Psi}(x) dx$.

Для вычисления структурной живучести по формулам (1–3) необходим набор минимальных сечений отказов, а также определение общих ФЭ в этих сечениях. При этом вычисление показателя структурной живучести с использованием обобщенной формулы (3) является суперсложной комбинаторной задачей. Следует отметить, что 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.

Как правило, структурный анализ функционирования БС МКА начинается с построения схемы функциональной целостности (СФЦ) объекта [9]. СФЦ представляет собой логически универсальное графическое средство структурного представления исследуемых свойств системных объектов. СФЦ позволяют корректно представлять, как все традиционные виды структурных схем, так и принципиально новый класс

немонотонных (некогерентных) структурных моделей различных свойств исследуемых систем. Разработка СФЦ БС МКА означает, прежде всего, графическое представление логических условий реализации собственных функций элементами и подсистемами МКА. Второй важной стороной построения и дальнейшего использования СФЦ является указание конкретной цели моделирования – логических условий реализации исследуемого системного свойства, например безотказности или отказа БС МКА, безопасности или возникновения аварии, реализации тех или иных режимов функционирования БС МКА и т. п.

Вместе с тем, известно, что геном структуры $\chi = (\chi_0, \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n)$ [8] содержит и позволяет определить следующую информацию в процессе структурного исследования сложных объектов: сведения о топологических свойствах структуры монотонной системы; информацию о принадлежности исследуемого объекта к классу монотонных или немонотонных систем; значения интегральных показателей структурно-функциональной живучести системы.

Так для монотонных систем первая ненулевая компонента генома $\chi_r, r > 0$ равна числу минимальных сечений отказов мощности r , а размерность генома равна числу ФЭ БС МКА. Зная данные значения, можно, используя формулу (1), вычислить верхнюю границу интегрального показателя структурной живучести БС МКА.

Методика оценивания структурно-функциональной живучести БС МКА

В рамках исследования структурной живучести БС МКА разработан алгоритм приближенного вычисления интегрального показателя структурной живучести БС МКА. Согласно соотношению двойственности монотонных структур полиномы надежной работы и отказа БС МКА связаны между собой выражением $R(P) + T(Q) = 1$, где $P + Q = 1$. Компонентами генома $\bar{\chi} = (\chi_0, \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n)$ являются коэф-

фициенты полинома $T(Q) = \chi_0 + \chi_1 Q + \chi_2 Q^2 + \dots + \chi_n Q^n$. Введем понятие двойственного генома структуры $\bar{\eta} = (\eta_0, \eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n)$, компонентами которого являются коэффициенты полинома надежной работы БС МКА $R(P) = \eta_0 + \eta_1 P + \eta_2 P^2 + \dots + \eta_n P^n$. Если геном структуры хранит характеристики минимальных сечений отказов структуры, то двойственный геном структуры отражает характеристики минимальных путей (кратчайших путей успешного функционирования) БС МКА. Так первая ненулевая компонента двойственного генома $\eta_l, l > 0$ равна числу минимальных путей мощности l . Используя геном и его двойственный аналог, можно вычислить приближенную оценку показателя структурной живучести БС МКА [8]. На рис. 1 представлена графическая интерпретация определения приближенной оценки структурной живучести БС МКА, которая в некоторых случаях представляет собой ее нижнюю границу.

Так, первые ненулевые компоненты генома и двойственного генома структуры позволяют вычислить величины $a = 1 - \frac{\chi_k}{C_n^k}$ и $b = \frac{\eta_l}{C_n^l}$. Тогда приближенную оценку структурной живучести можно вычислить следующим образом

$$\tilde{F}_s = \frac{k-1}{n} + \frac{1+a}{2} \cdot \frac{1}{n} + \frac{a+b}{2} \cdot \frac{n-k-1}{n} + \frac{b}{2} \cdot \frac{1}{n} = \frac{2k-1}{2n} + (1 - \frac{\chi_k}{C_n^k} + \frac{\eta_l}{C_n^l}) \cdot \frac{n-k-l+1}{2n} \quad (4)$$

где

$$\chi_k > 0, \chi_i = 0 \forall 0 < i < k, \eta_l > 0, \eta_i = 0 \forall 0 < j < l.$$

Для формального описания и анализа процесса деградации (восстановления) БС МКА в качестве факторов, с помощью которых можно изменять структуру БС МКА, будем рассматривать операцию удаления (восстановления) критических элементов $\{P_{j_1}, P_{j_2}, \dots, P_{j_N}\} = \bar{P}$ из

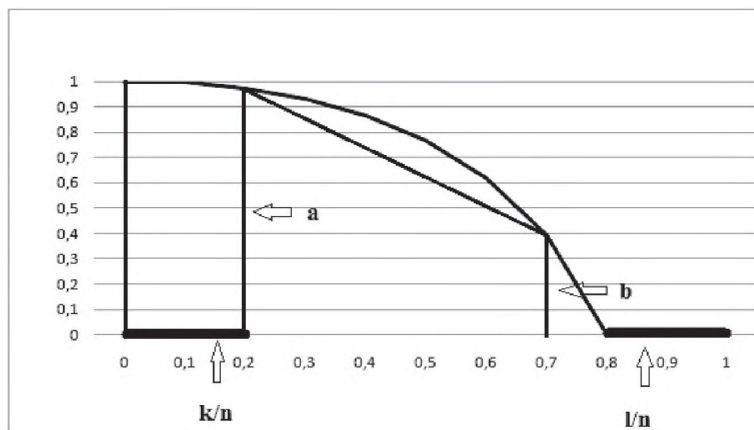


Рис. 1. Графическая интерпретация вычисления нижней границы

СФЦ. В общем случае в качестве критичных элементов могут рассматриваться все ФЭ БС МКА.

В процессе удаления (восстановления) элементов структура БС МКА может находиться в одном из своих промежуточных состояний S_a . Согласно концепции генома структуры структурные состояния S_a (начальное, финальное, промежуточные) характеризуются своими геномами $\bar{\chi}_a$ (под $\bar{\chi}_a$ в статье будем понимать двойственный аналог генома), при этом показатели структурно-функциональной живучести БС МКА в различных структурных состояниях можно вычислять по следующим формулам [8]:

$$\begin{aligned}
 F_{\text{однород}}(\bar{\chi}_a) &= \bar{\chi}_a \cdot \left(1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots, \frac{1}{n+1}\right)^T, \\
 F_{\text{неоднород}}(\bar{\chi}_a) &= \bar{\chi}_a \cdot \left(1, \frac{1}{2}, \frac{1}{2^2}, \dots, \frac{1}{2^n}\right)^T, \\
 F_{\text{однообраз}}(\bar{\chi}_a) &= \sup_{\mu \in \{0,1\}} \min \left\{ \bar{\chi}_a \cdot (1, \mu, \mu^2, \dots, \mu^n)^T, g(\mu) \right\}.
 \end{aligned} \tag{5}$$

Будем считать, что структурное состояние S_a , характеризующееся геномом $\bar{\chi}_a$, непосредственно связано со структурным состоянием S , описываемого геномом $\bar{\chi}$, если существует ФЭ $(\exists P, P \in \tilde{P})$, отказ (восстановление) которого ($P_j = 0$ или $P_j = 1$) переводит систему из состояния S в состояние S_a (из состояния S_a в состояние S). Данную вариацию структурного состояния БС МКА обозначим следующим образом: $\bar{\chi} \xrightarrow{P_j} \bar{\chi}_a$. Множество всех структурных состояний, непосредственно связанных с состоянием $\bar{\chi}$, обозначим $X(\bar{\chi})$.

Тогда одну из возможных траекторий реконфигурации структуры БС МКА в процессе возникновения отказов можно описать следующей цепочкой переходов

$$\bar{\chi}_{\alpha_0} \xleftarrow{P_{j_1}} \bar{\chi}_{\alpha_1} \xleftarrow{P_{j_2}} \bar{\chi}_{\alpha_2} \xleftarrow{P_{j_3}} \dots \xleftarrow{P_{j_{N-1}}} \bar{\chi}_{\alpha_{N-1}} \xrightarrow{P_{j_N}} \bar{\chi}_{\alpha_N},$$

где $\bar{\chi}_{\alpha_0} = \bar{\chi}_0$, $\bar{\chi}_{\alpha_N} = \bar{\chi}_f$, множество $\{P_{j_1}, P_{j_2}, \dots, P_{j_N}\} = \tilde{P}$, т.е. множество отказавших (восстановленных) ФЭ БС МКА в цепочке перехода является перестановкой элементов множества \tilde{P} .

Структурные изменения, происходящие в промежуточном состоянии $\bar{\chi}_a$ на траектории деградации (восстановления), будем оценивать одним из показателей структурно-функциональной живучести БС МКА (5), входящим в рассматриваемое множество:

$$F_{\text{над}}(\bar{\chi}_a) \in \{F_{\text{однород}}(\bar{\chi}_a), F_{\text{неоднород}}(\bar{\chi}_a), F_{\text{однообраз}}(\bar{\chi}_a)\}.$$

Кроме того, в каждом промежуточном структурном состоянии $\bar{\chi}_a$ БС МКА характеризуется некоторым набором структурно-топологических ограничений $\Psi_l(\bar{\chi}_a) \leq 0, l = 1, 2, \dots, L$, формально заданных и количественно оцениваемых с помощью [8] соответствующих показателей структурной живучести, гибкости, достижимости, сложности структурного построения и т.д. Другими словами, данные ограничения задают область допустимых вариаций, которую в дальнейшем будем обозначать Ξ . Тогда задачу построения оптимистического (пессимистического) сценария деградации и восстановления БС МКА можно представить в виде следующих оптимизационных задач (6).

$$\sum_{j=0}^N F_{\text{над}}(\bar{\chi}_{\alpha_j}) \rightarrow \max(\min)$$

$$\begin{aligned}
 &\bar{\chi}_{\alpha_j} \in X(\bar{\chi}_{\alpha_{j+1}}) \\
 &\bar{\chi}_{\alpha_0} = \bar{\chi}_0, \bar{\chi}_{\alpha_N} = \bar{\chi}_f, \\
 &\Psi_l(\bar{\chi}_{\alpha_j}) \leq 0, l = 1, 2, \dots, L \\
 &\{P_{j_1}, P_{j_2}, \dots, P_{j_N}\} = \tilde{P}
 \end{aligned} \tag{6}$$

В работе [8] обоснован комбинированный метод случайного направленного поиска вариантов решения поставленной задачи и разработан алгоритм, реализующий приведенный метод. Сущность предложенного метода состоит в проведении повторяющихся испытаний, каждое из которых определяет переход от одной траектории реконфигурации БС МКА к другой, лучшей, что и образует процедуру последовательного улучшения решения.

На рис. 2 представлена траектория реконфигурации структуры функционирования БС МКА $\mu_{\xi}^{(k)}$. Площадь $S^{(k)}$ равная $\max_{j=0,1,\dots,N} \{F_{\text{фг}}(\bar{\chi}_{\alpha_j}^{(k)})\} \cdot N$ пропорциональна суммарному показателю структурно-функ-

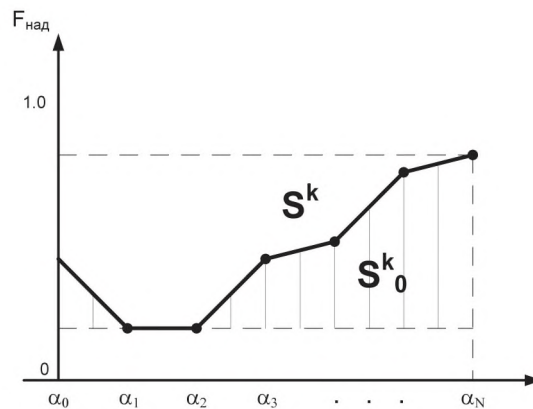


Рис. 2. Траектория реконфигурации структуры функционирования БС МКА

циональной живучести функционирования БС МКА вдоль траектории в случае сохранения возможной максимальной живучести функционирования при развитии рассматриваемого сценария. Вычисленная площадь $S_0^k = \sum_{j=0}^{N-1} \frac{F_{\text{над}}(\bar{x}_{a_j}^{(k)}) + F_{\text{над}}(\bar{x}_{a_{j+1}}^{(k)})}{2}$ равна суммарной структурно-функциональной живучести функционирования БС МКА в процессе реконфигурации в рамках сценария $\mu_{\xi}^{(k)}$. Тогда отношение указанных площадей $J^{(k)} = \frac{S_0^k}{S^k}$ позволяет количественно оценить обобщенный показатель структурно-функциональной живучести БС МКА в процессе его структурной реконфигурации по сценарию $\mu_{\xi}^{(k)}$.

По оси абсцисс откладываются отказавшие ФЭ БС МКА, неявно характеризующие промежуточные состояния БС МКА. Следует отметить, что максимальное значение обобщенного показателя структурно-функциональной живучести $J^{\max} = \max_{\xi} \{J^{\xi}\}$ будет достигаться на оптимистическом сценарии реконфигурации БС МКА, а минимальное значение $J^{\min} = \min_{\xi} \{J^{\xi}\}$ – на пессимистическом. Проведем M имитационных экспериментов. На каждом k -ом эксперименте строится последовательность $\mu_{\xi}^{(k)} = [\bar{x}_{a_0}, \bar{x}_{a_1}, \bar{x}_{a_2}, \dots, \bar{x}_{a_{n-1}}, \bar{x}_{a_n}]$ (где $\bar{x}_{a_0} = \bar{x}_0, \bar{x}_{a_n} = \bar{x}_f$), соответствующая траектории реконфигурации БС МКА. Для построенной траектории вычисляется значение обобщенного показателя структурно-функциональной живучести $J^k = \frac{S_0^k}{S^k}$. Далее находим среднее значение обобщенного показателя структурно-функциональной живучести всех испытаний $J^0 = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M J^k$. Тогда можно утверждать, что реальные значения обобщенного показателя структурно-функциональной живучести БС МКА J_{GS} будут лежать в интервале $[J^{\min}, J^{\max}]$ и наиболее ожидаемое значение равно J^0 . При этом значения показателя J_{GS} можно задавать нечетким треугольным числом (α, α, β) , где $\alpha = J^0, \alpha = J^0 - J^{\min}, \beta = J^{\max} - J^0$.

Кроме того, вычисление значений показателя структурно-функциональной живучести $F_{\text{над}}(\bar{x}_a) \in \{F_{\text{однород}}(\bar{x}_a), F_{\text{неоднород}}(\bar{x}_a), F_{\text{однородно}}(\bar{x}_a)\}$ может осуществляться из предположения, что структура БС МКА состоит только из однородных по надежности

выполнения своих функций элементов, только из неоднородных по надежности выполнения своих функций элементов, и наконец имеются возможные отказы выполнения своих функций ФЭ. Для каждого из этих трех случаев, произведя расчет значений показателя J_{GS} , получим соответственно три нечетких треугольных результата: $(a^0, \alpha^0, \beta^0), (a^n, \alpha^n, \beta^n), (a^s, \alpha^s, \beta^s)$. Тогда в качестве значения обобщенного показателя структурно-функциональной живучести БС МКА J_{GS} будем полагать среднюю величину полученных результатов $J_{GS} = \frac{(a^0, \alpha^0, \beta^0) + (a^n, \alpha^n, \beta^n) + (a^s, \alpha^s, \beta^s)}{3}$.

Таким образом, задача вычисления значения обобщенного показателя структурно-функциональной живучести БС МКА свелась к анализу оптимистического, пессимистического или случайных (произвольных) траекторий структурно-функциональной реконфигурации объекта, вызванных отказами (восстановлением) ФЭ БС МКА. Обоснован подход к вычислению значений обобщенного показателя структурно-функциональной живучести БС МКА в виде нечетких треугольных чисел.

Следует отметить, что отказ (восстановление) того или иного элемента приводит к отказу (восстановлению) логически с ним связанных остальных ФЭ БС МКА. Поэтому кроме введенного обобщенного показателя структурно-функциональной живучести БС МКА J_{GS} можно ввести абсолютный показатель структурно-функциональной живучести БС МКА. Каждая траектория реконфигурации структуры БС МКА характеризуется количеством уровней деградации J_D , последний из которых соответствует переводу БС МКА в неработоспособное состояние. Так, для пессимистической траектории количество уровней минимально и равно J_D^{\min} , для оптимистической траектории оно максимально – J_D^{\max} . Значения абсолютного показателя структурно-функциональной живучести БС МКА J_{AG} будут лежать в интервале $[J_D^{\min}, J_D^{\max}]$, а также можно вычислить наиболее ожидаемое значение равное J_D^0 . При этом значения показателя J_{AG} аналогично, как и J_{GS} , можно задавать нечетким треугольным числом $(\alpha_A, \alpha_A, \beta_A)$, где $\alpha_A = J_D^0 - J_D^{\min}, \beta_A = J_D^{\max} - J_D^0$.

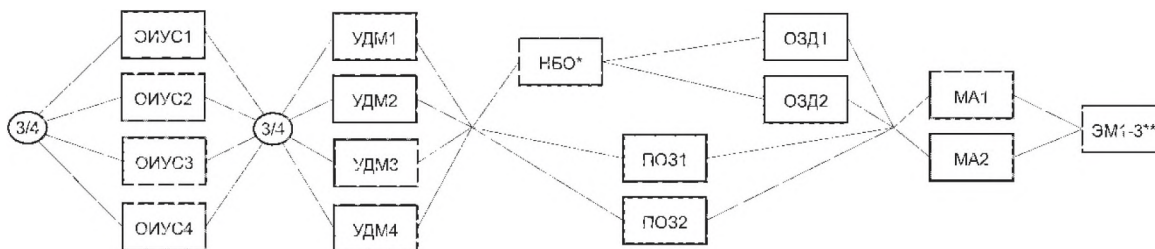


Рис. 3. Схема взаимодействия ФЭ БС СУД МКА

Экспериментальные исследования СУД МКА «АИСТ-2Д»

Проиллюстрируем предложенную методику на примере расчета показателей структурной и структурно-функциональной живучести для системы управления движением (СУД) МКА «Аист-2д» [10]. СУД предназначена для измерения текущего углового положения МКА в заданных системах координат (СК) и его угловой скорости с инерциальной СК, ориентации и стабилизации МКА в заданных СК. В состав СУД входят следующие ФЭ: отдельный измеритель угловой скорости (ОИУС) – 4 шт.; управляющий двигатель маховик (УДМ) – 4 шт.; прибор ориентации по Земле (ПОЗ) – 2 шт.; прибор ориентации по Солнцу (ПОС) – 2 шт.; оптический звездный датчик (ОЗД) – 2 шт.; магнитометр (МА) – 2 шт.; электромагниты (ЭМ) – 3 шт.

Структурно-функциональная схема взаимодействия указанных ФЭ БС СУД МКА при выполнении режима «Приведения МКА в ориентированное в орбитальной СК положение. Точная ориентация» представлена на рис. 3.

Из приведенной схемы видно, что для построения конфигурации ФЭ СУД МКА режима «точная ориентация» используется принцип «3 из 4», что затрудняет описать логическую взаимосвязь выполняемых функций элементами и исполнительными органами СУД МКА с использованием графовых моделей.

Однако с использованием аппарата графического представления СФЦ возможно описать логические условия реализации функций ФЭ СУД МКА.

На рис. 4 представлена соответствующая СФЦ ФЭ СУД МКА для выполнения режима «точная ориентация». Логическим критерием успешного выполнения режима «точная ориентация» МКА является прямой выход фиктивной вершины y_{35} . После решения системы логических уравнений получаем логическую функцию успешного выполнения режима «точная ориентация» МКА и соответствующий вероятностный полином данной

схемы. Преобразовав его к однородному виду вычисляем геном структуры $\bar{\chi} = (0, 3, 10, -53, 43, 162, -459, 514, -243, -221, 879, 1441, 1217, -220, -597, 660, -328, 84, -9)$ и $\bar{\eta} = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 59, -86, 150, 477, -508, 277, -78, 9)$ – двойственный геном.

Структура функциональных взаимосвязей ФЭ БС СУД МКА режима «точная ориентация» является монотонной. Тогда по формуле (1) вычисляется верхняя оценка интегрального показателя структурной живучести СУД МКА, которая в этом случае равна $F_g = \int \Psi(x) dx = 0,2865$. Для вычисления приближенной оценки показателя структурной живучести СУД МКА используется формула (4). Из генома $\bar{\chi}$ и его двойственного аналога $\bar{\eta}$ находим значения переменных, необходимых для вычисления по формуле (4), $k = 1, \chi_k = 3, l = 10, \eta_l = 1, n = 18$. Приближенная оценка показателя структурной живучести СУД МКА при выполнении режима «точная ориентация» равна 0,213.

На рис. 5 представлена структурно-функциональная схема взаимодействия ФЭ СУД МКА при выполнении режима «ориентация на Солнце». Исходными данными для вычисления приближенной оценки показателя структурной живучести СУД МКА при выполнении данного режима являются $k = 2, \chi_k = 10, l = 8, \eta_l = 48, n = 18$. Результат вычисления приближенной оценки показателя структурной живучести СУД МКА составил 0,317, т.е. структурная живучесть конфигурации ФЭ СУД МКА при выполнении режима «ориентация на Солнце» более живуча, чем при режиме «точная ориентация». Полученные результаты можно обосновать следующими доводами:

- 1) УДМ привлекаются к работе при режиме «ориентация на Солнце» в отличие от режима «точная ориентация» не по принципу «3 из 4», а «2 из 4». Такая схема подключения УДМ обладает большей структурной живучестью;
- 2) ЭМ при режиме «ориентация на Солнце» привлекаются по принципу «2 из 3», а не одновременно все как в режиме «точная ориентация». Схема подключения «2 из 3» обладает большей структурной живучестью;

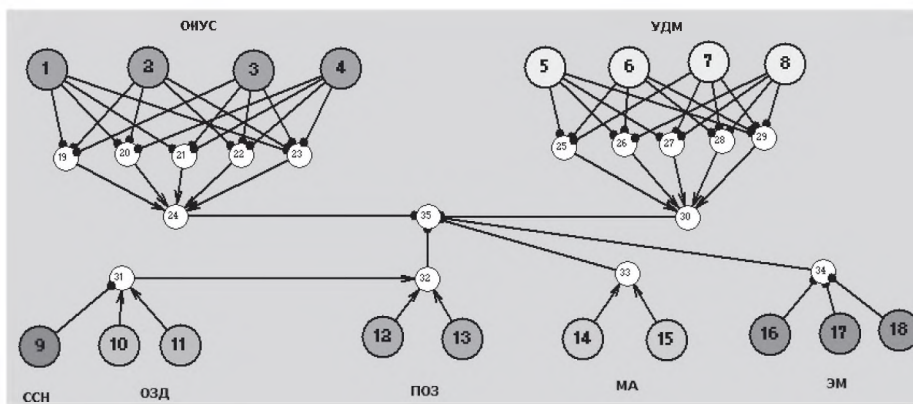


Рис. 4. СФЦ режима «точная ориентация» МКА «АИСТ-2Д»

Таблица 1

Значения показателя структурно-функциональной живучести СУД МКА в режиме «точная ориентация»

	Относительный показатель структурно-функциональной живучести				Абсолютный показатель структурно-функциональной живучести			
	Однород. отказ	Неоднород. отказ	Возможн. отказ	Средние знач.	Однород. отказ	Неоднород. отказ	Возможн. отказ	Сред. знач.
Пессимистическая траектория	0,0556	0,0556	0,0556	0,0556	2	2	2	2
Произвольная (Сред. рез.)	0,1529	0,1021	0,1434	0,1328	4	3	5	4
Оптимистическая траектория	0,2635	0,1831	0,3118	0,2528	9	9	9	9

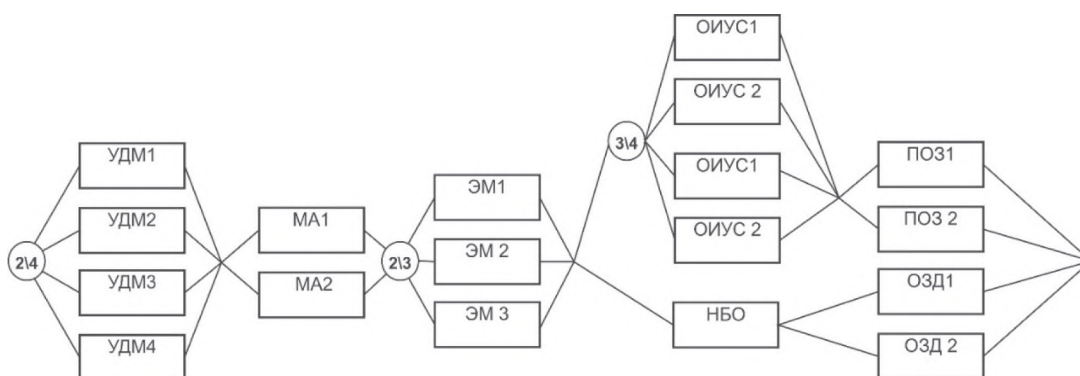


Рис. 5. Схема режима «ориентация на Солнце»

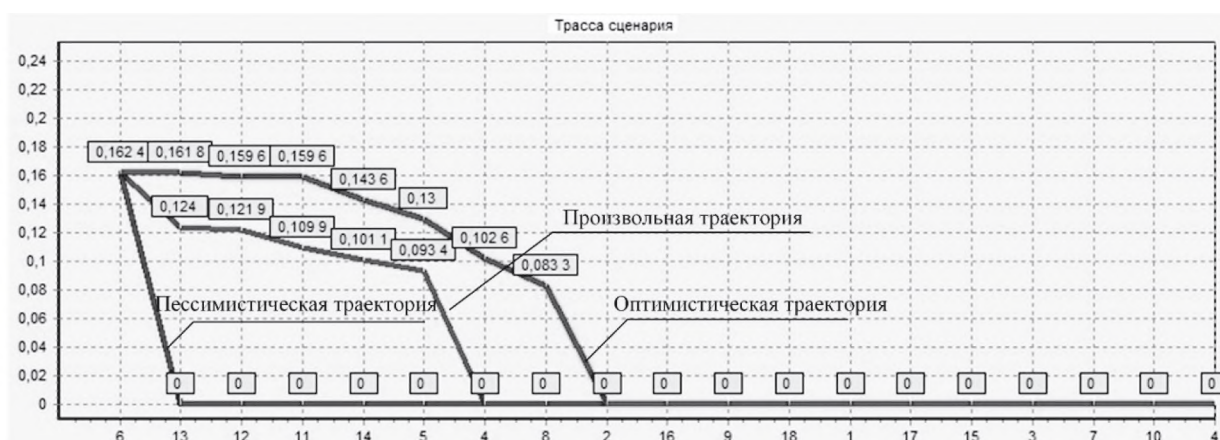


Рис. 6. Траектории реконфигурации БС СУД МКА

Таблица 2

**Значения показателя структурно-функциональной живучести СУД МКА
в режиме «ориентация на Солнце»**

	Относительный показатель структурно-функциональной живучести				Абсолютный показатель структурно-функциональной живучести			
	Однород. отказ	Неоднород. отказ	Возможн. отказ	Средние знач.	Однород. отказ	Неоднород. отказ	Возможн. отказ	Сред. знач.
Пессимистическая траектория	0,1032	0,0778	0,1004	0,0938	3	3	3	3
Произвольная (Сред. рез.)	0,2307	0,1409	0,2370	0,2029	6	6	6	6
Оптимистическая траектория	0,3232	0,2397	0,3538	0,3056	12	12	12	12

3) ОИУС привлекаются в режиме «ориентация на Солнце» параллельно с ССН и ОЗД, а не со всеми ФЭ как в режиме «точная ориентация».

Для вычисления значений показателей структурно-функциональной живучести СУД МКА используется алгоритм, реализующий комбинированный метод [8] случайного направленного поиска решения задачи (6). На его основе для СФЦ СУД МКА в режиме «точная ориентация» построены траектории реконфигурации БС СУД МКА, представленные на рис. 6.

Результаты применения предложенной методики для оценивания структурно-функциональной живучести СУД МКА в режиме «точная ориентация» при числе испытаний представлены в таблице 1.

Результаты испытаний, проведенных для оценивания структурно-функциональной живучести СУД МКА в режиме «ориентация на Солнце», представлены в таблице 2.

Полученные результаты уточняют результаты приближенных вычислений структурной живучести БС СУД МКА, приведенные выше. Абсолютный показатель структурно-функциональной живучести БС СУД МКА оценивается количеством уровней деградации для перевода БС МКА в неработоспособное состояние. Кроме того, они подтверждают повышенную живучесть конфигурации ФЭ СУД МКА при выполнении режима «ориентация на Солнце» по сравнению с режимом «точная ориентация».

Заключение

Отличительная особенность и новизна предложенной методики состоят в том, что на единой методологической основе (оригинальная концепция генома структурного построения структурно-сложных объектов) возможно проводить исследование структурно-функциональных свойств и осуществлять оперативное вычисление интервальных, оптимистических и пессимистических оценок показателей структурной живучести как монотонных, немонотонных, так и однородных, неоднородных структур БС МКА.

Литература

1. Ахметов, Р. Н. Байпасность как атрибут живучести автоматических космических аппаратов в аномальных полётных ситуациях / Р.Н. Ахметов, В.П. Макаров, А.В. Соллогуб // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2015. – № 4(44). – С. 9–21.
2. Ханцеверов, Ф. Р. Моделирование космических систем изучения природных ресурсов Земли / Ф.Р. Ханцеверов, В.В. Остроухов. – М.: Машиностроение, 1989. – 264 с.
3. Куренков, В.И. Основы устройства и моделирования целевого функционирования космических аппаратов наблюдения: учеб. пособие / В.И. Куренков, В.В. Салмин, Б.А. Абрамов. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. – 296 с.
4. Афанасьев, В. Г. Методы анализа надёжности и критичности отказов сложных систем: учебное пособие / В.Г. Афанасьев, В.А. Зеленцов, А.Н. Миронов. – СПб.: МО, 1992. – 99 с.
5. Кравец, В. Г. Основы управления космическими полетами / В.Г. Кравец, В.Е. Любинский. – М.: Машиностроение, 1983. – 224 с.
6. Системный анализ и организация автоматизированного управления космическими аппаратами: учебник / под ред. Ю. С. Мануйлова. – СПб.: ВКА, 2010. – 266 с.
7. Павлов, А. Н. Нечетко-возможностный подход к анализу и оцениванию безопасности сложных организационно-технических систем / А.Н. Павлов // Региональная информатика-2008: материалы XI Санкт-Петербургской международной конференции РИ-2008 (РФ, г. Санкт-Петербург, 22–24 октября 2008 г.). – СПб.: СПОИСУ, 2008. – С. 48–49.
8. Системный анализ организационно-технических систем космического назначения: учебник / Е.Н. Алеппин [и др.]; под общ. ред. А.Н. Павлова. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2018. – 370 с.
9. Применение общего логико-вероятностного метода для анализа технических, военных организационно-функциональных систем и вооруженного противоборства: монография, научное издание / В.И. Поленин [и др.]; под ред. А.С. Можаяева. – СПб.: СПб – региональное отделение РАЕН, 2011. – 416 с.
10. Опыт-технологический малый космический аппарат «АИСТ-2Д». – Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2017. – 324 с.