

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Научная статья

УДК: 519.8

DOI: [10.34759/trd-2021-120-11](https://doi.org/10.34759/trd-2021-120-11)

Метод оценивания показателей живучести бортовых систем малых космических аппаратов в условиях изменяющихся режимов функционирования и деструктивных воздействий

Александр Николаевич Павлов¹, Дмитрий Александрович Павлов², Александр Бахтиёрович Умаров³

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

¹Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, СПб ФИЦ РАН, Санкт-Петербург, Россия

^{1,2,3} vka@mil.ru 

Аннотация. В ряде случаев разработку алгоритмов управления многорежимными системами (в частности, малыми космическими аппаратами) приходится осуществлять в условиях априорной неопределенности о действии внешних возмущений, значениях параметров и характеристиках объекта управления. Реализация требований многофункционального и многорежимного отказоустойчивого и самовосстанавливаемого управления в указанных условиях тесно связана с оцениванием их структурно-функциональной живучести. В данной статье предлагается метод оценивания структурно-функциональной живучести бортовых систем малых космических аппаратов, основанный на

концепции параметрического генома структуры системы управления и позволяющий учитывать различные варианты задействования режимов функционирования.

Ключевые слова: малый космический аппарат, структурно-функциональная живучесть, система управления движением, режимы функционирования

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

Для цитирования: Павлов А.Н., Павлов Д.А., Умаров А.Б. Метод оценивания показателей живучести бортовых систем малых космических аппаратов в условиях изменяющихся режимов функционирования и деструктивных воздействий // Труды МАИ. 2021. № 120. DOI: [10.34759/trd-2021-120-11](https://doi.org/10.34759/trd-2021-120-11)

INFORMATICS, COMPUTATION ENGINEERING AND MANAGEMENT

Original article

A method for survivability indices evaluation of a small spacecraft onboard systems under conditions of operating modes changing and destructive impacts

Alexander N. Pavlov¹, Dmitry A. Pavlov², Alexander B. Umarov³

^{1,2,3}Military space Academy named after A.F. Mozhaisky, Saint Petersburg, Russia

¹Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, SPC RAS, Saint Petersburg, Russia

Abstract. In the course of the research and development works performing on a spacecraft creation and development (a small spacecraft in particular), the important and integral condition of studying the onboard systems capabilities of a small spacecraft consists in performing analysis and evaluation of its structural states architecture. These states reflect both functional and technological specifics of the small spacecraft control. One of the primary tasks associates with the necessity of structural and functional survivability evaluating of the subsystems and a spacecraft as a whole, which often has to be performed under conditions of uncertainty due to the impossibility of simulating the whole spectrum of the space medium conditions. With a view to the existing uncertainty, it is necessary to consider all possible modes of the system development or degradation while its separate elements failure, i.e. pessimistic, optimistic and intermediate scenarios. The structural analysis of the small spacecraft onboard system functioning begins, as a rule, with plotting a diagram of the object functional integrity, representing a logically universal graphical tool for the structural representation of the system objects' properties under study. Functional integrity diagrams allow representing correctly both all traditional types of structural diagrams (block diagrams, fault trees, event trees, connectivity graphs with cycles) and a crucially new class of non-monotonic structural models of various properties of the studied systems. The functional integrity diagram of the small spacecraft onboard system allows graphical representation of logical conditions for their own functions implementation by the elements and subsystems of the small spacecraft. It allows

representing also the modeling goals, i.e. logical conditions for the studied system property implementation, such as, the system reliability or failure, safety or accident emergence, these or that operation modes implementation of the small spacecraft onboard control system, etc.

Keywords: small spacecraft, structural and functional survivability, motion control system, operating modes

Funding: Research on this topic was carried out 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.

For citation: Pavlov A.N., Pavlov D.A., Umarov A.B. A method for survivability indices evaluation of a small spacecraft onboard systems under conditions of operating modes changing and destructive impacts. *Trudy MAI*, 2021, no. 120. DOI: [10.34759/trd-2021-120-11](https://doi.org/10.34759/trd-2021-120-11)

Введение

Одним из неперенных условий выполнения программы полёта малым космическим аппаратом (МКА) является обеспечение его живучести [1]. Так, на этапах проектирования и создания МКА для выполнения программы полёта устанавливается ресурсный баланс бортовых систем (БС), в который входит необходимо достаточный запас встроенных в систему структурных и функциональных ресурсов, масса рабочего тела для ракетных двигателей, мощность бортовых источников электроэнергии [2,3]. Однако в течение срока

своего существования на космический аппарат оказывается существенное влияние различными внешними факторами и специфическими условиями пребывания в космическом пространстве, к которым можно отнести [4-6]: особый температурный режим, вакуум, невесомость, вибрации, электромагнитное излучение, аэрогазодинамические эффекты, тяжёлые заряженные частицы, воздействие электростатического и магнитного полей, радиошумы и т.д. Несмотря на большой объём наземных испытаний, учесть все возможные факторы, приводящие к потере расчётного ресурса БС в полёте из-за аномальных полётных ситуаций (АПС), невозможно. Во-первых, не все условия космического полёта можно воспроизвести на Земле в процессе комплексных испытаний, в частности, условия невесомости, воздействия ионизирующего излучения и другие [7]. Во-вторых, каждый МКА является «продуктом» мелкосерийного и даже единичного производства, что также не позволяет проводить полную лётную квалификацию надёжности систем [8].

Кроме того, функциональные элементы и подсистемы БС МКА могут быть задействованы в различных режимах функционирования для обеспечения целевых задач полета. Причем режимы работы БС МКА различаются с точки зрения характера и интенсивности их использования. В зависимости от решаемой целевой задачи МКА и совместимости режимы функционирования БС могут выполняться во времени как последовательно, так и параллельно, а также иметь различную интенсивность задействования.

Поэтому важным и неотъемлемым условием исследований, посвященных обеспечению живучести БС МКА, является проведение анализа такого важного свойства МКА как структурно-функциональная живучесть в условиях многорежимности и деструктивных воздействий [9-12]. Далее под структурно-функциональной живучестью БС МКА будем понимать способность рассматриваемого объекта, которая позволяет ему сохранять в определенных пределах качество своего целевого функционирования (реализации режимов функционирования) (или восстанавливать такую способность) путем изменения (формирования) структурно-функционального построения конфигураций БС. Причем исследование данного свойства следует проводить с учетом возможности совместного применения режимов функционирования, равноценности интенсивностей задействования режимов функционирования и однородности структуры элементов и подсистем БС МКА.

Процедура вычисления обобщенного показателя структурно-функциональной живучести БС МКА

Процедура вычисления обобщенного показателя структурно-функциональной живучести БС МКА может быть разделена на несколько этапов.

Этап I. Исследование структурно-функциональной надежности БС МКА, включающее построение параметрического генома исследуемой структуры [12] и определение на его основе интегральных показателей структурно-функциональной надежности для различных вариантов описания элементов

структуры [11-13] (структура состоит из однородных или неоднородных по вероятности безотказной работы элементов, элементы имеют однородное нечетко-возможностное описание функционирования), а также учет возможности совместного или несовместного использования режимов функционирования и равноценности интенсивностей их задействования.

Этап II. Нахождение различных траекторий реконфигурации исследуемой структуры: пессимистической, оптимистической и случайной [14-16].

Этап III. Проведение серии вычислительных экспериментов для определения значений показателей структурно-функциональной живучести в виде нечеткого треугольного числа.

Важно обратить внимание, что перед тем, как приступить к *Этапу I*, необходимо провести предварительный анализ возможных схем построения и режимов функционирования БС МКА. Методики и подходы к проведению такого анализа является темой отдельного исследования и в данной статье не рассматриваются. Данная тематика и отдельные её аспекты более подробно рассмотрены в работах [12,17]. Поэтому авторы статьи предполагают, что указанный предварительный этап анализа проведён и его результаты обобщены в виде трёх схем, представленных на рисунках 2, 3, 4.

Далее более подробно рассмотрим каждый этап процедуры вычисления обобщённого показателя структурно-функциональной живучести БС МКА.

Для исследования структурно-функциональной надежности БС МКА целесообразно использовать возможности общего логико-вероятностного метода (ОЛВМ) и построить схему функциональной целостности (СФЦ) БС МКА [18]. Следует отметить, что при наличии в СФЦ исследуемой системы групп несовместных событий (ГНС) [18], используемых для отражения раздельного (последовательного) задействования как режимов функционирования, так и элементов БС, они автоматически учитываются при построении логических и вероятностных моделей.

Используя программный комплекс автоматизированного структурно-логического вероятностного моделирования «Арбитр» [18], для СФЦ БС МКА получаем два вероятностных полинома успешного ее функционирования (реализации режимов функционирования) (1)

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

где $\mathfrak{R}_c(P_1, \dots, P_n, P_{n+1}, \dots, P_{n+m}, Q_1, \dots, Q_n, Q_{n+1}, \dots, Q_{n+m})$ - вероятностная функция реализации режимов функционирования БС МКА, не являющихся ГНС;

$\mathfrak{R}_p(P_1, \dots, P_n, P_{n+1}, \dots, P_{n+m}, Q_1, \dots, Q_n, Q_{n+1}, \dots, Q_{n+m})$ - вероятностная функция реализации режимов функционирования БС МКА, представляющих ГНС; $P_i(Q_i), i = 1, \dots, n$ - вероятности безотказной работы (отказа) функциональных элементов (ФЭ) БС МКА, а $P_{n+i}(Q_{n+i}), i = 1, \dots, m$ - интенсивности потребностей (не востребования) в реализации режимов функционирования БС МКА.

Обозначим интенсивности потребностей в реализации режимов функционирования БС МКА через $\beta_i = P_{n+i}, i = 1, \dots, m$. Используя параметрический геном для структуры без ГНС $\vec{\chi}_c(\beta_1, \dots, \beta_m) = (\chi_{c0}(\beta_1, \dots, \beta_m), \chi_{c1}(\beta_1, \dots, \beta_m), \dots, \chi_{cn}(\beta_1, \dots, \beta_m))^T$ и параметрический геном для структуры с ГНС $\vec{\chi}_p(\beta_1, \dots, \beta_m) = (\chi_{p0}(\beta_1, \dots, \beta_m), \chi_{p1}(\beta_1, \dots, \beta_m), \dots, \chi_{pm}(\beta_1, \dots, \beta_m))^T$ [12], вычислим оценки структурно-функциональной надежности БС, зависящие от параметров β_1, \dots, β_m интенсивностей отдельного (ГНС) или совместного использования режимов функционирования.

При вероятностном описании безотказной работы ФЭ для случая, когда вероятность безотказной работы ФЭ БС одинакова (однородная структура) [12], показатель структурно-функциональной надежности вычисляется по следующей формуле (2)

$$F_{\text{однор}}(\vec{\chi}(\beta_1, \dots, \beta_m)) = \int_0^1 \mathfrak{R}(P, \beta_1, \dots, \beta_m) dP = \vec{\chi}(\beta_1, \dots, \beta_m) \cdot (1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots, \frac{1}{n+1})^T, \quad (2)$$

где $\mathfrak{R}(P, \beta_1, \dots, \beta_m)$ является полиномом либо

$\mathfrak{R}_c(P_1, \dots, P_n, P_{n+1}, \dots, P_{n+m}, Q_1, \dots, Q_n, Q_{n+1}, \dots, Q_{n+m})$, либо

$\mathfrak{R}_p(P_1, \dots, P_n, P_{n+1}, \dots, P_{n+m}, Q_1, \dots, Q_n, Q_{n+1}, \dots, Q_{n+m})$ при условии, что

$P_1 = P_2 = \dots = P_n = P, P_{n+1} = \beta_1, P_{n+2} = \beta_2, \dots, P_{n+m} = \beta_m$, а $\vec{\chi}(\beta_1, \dots, \beta_m)$ соответствующий

параметрический геном для структуры без ГНС или структуры с ГНС.

При различных значениях вероятности безотказной работы ФЭ БС (неоднородная структура) предлагаем использовать в качестве показателя структурно-функциональной надежности [12,17,19] выражение (3)

$$F_{\text{неоднор}}(\bar{\chi}(\beta_1, \dots, \beta_m)) = \bar{\chi}(\beta_1, \dots, \beta_m) \cdot \left(1, \frac{1}{2}, \frac{1}{2^2}, \dots, \frac{1}{2^n}\right)^T. \quad (3)$$

Если при выполнении функций ФЭ не удастся выявить достаточно определенную стохастическую закономерность безотказной работы, то предлагается прибегнуть к нечетко-возможностному подходу для описания поведения ФЭ, применив операцию нечеткого интегрирования по возможностной мере [9] для вычисления интегрального показателя структурно-функциональной надежности БС

$$F_{\text{однорвозм}}(\bar{\chi}(\beta_1, \dots, \beta_m)) = \sup_{\mu \in [0,1]} \min\{R(\mu, \beta_1, \dots, \beta_m), g(\mu)\} = \sup_{\gamma \in [0,1]} \min\{\gamma, G(\{\mu | R(\mu, \beta_1, \dots, \beta_m) \geq \gamma\})\}. \quad (4)$$

Заметим, что при одновременном (совместном, параллельном) задействовании режимов функционирования на величины β_1, \dots, β_m в самом общем случае устанавливаются следующие ограничения $0 \leq \beta_i \leq 1, i = 1, \dots, m$. В случае раздельного задействования режимов к данным ограничениям необходимо дополнить следующее $\sum_{i=1}^m \beta_i \leq 1$. Помимо совместимости режимов функционирования следует отметить, что интенсивность их задействования может быть как одинаковой (равноценные по интенсивности режимы, т.е. $\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_m = \beta$), так и различной (неравноценные режимы). Тогда при раздельном задействовании равноценных по интенсивности режимов

ограничение $\sum_{i=1}^m \beta_i \leq 1$ примет вид $\beta \leq \frac{1}{m}$. Принимая во внимание все сказанное

выше, для исследования структурно-функциональной надежности объекта целесообразно ввести следующие интегральные показатели

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

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

$$J_{pn} = m! \cdot \iiint_{\substack{\beta_1 + \dots + \beta_m \leq 1 \\ 0 \leq \beta_i \leq 1, i=1, \dots, m}} F_*(\vec{\chi}_p(\beta_1, \dots, \beta_m)) d\beta_1 d\beta_2 \dots d\beta_m, \quad (7)$$

$$J_{cn} = \int_0^1 \int_0^1 \dots \int_0^1 F_*(\vec{\chi}_c(\beta_1, \dots, \beta_m)) d\beta_1 d\beta_2 \dots d\beta_m, \quad (8)$$

где показатели (5) и (6) позволяют оценивать обобщенную структурно-функциональную надежность объекта при соответственно отдельном и совместном действии равноценных по интенсивности режимов функционирования, а показатели (7) и (8) - при соответственно отдельном и совместном использовании неравноценных по интенсивности режимов функционирования. При этом в формулах (5)-(8) в качестве функции F_* могут быть использованы $F_{однор}$, $F_{неоднор}$ или $F_{однорвозм}$ (см. формулы (2)-(4)).

Для вычисления обобщенного показателя структурно-функциональной живучести БС МКА воспользуемся подходом, изложенным в работе [17]. Вкратце суть данного подхода заключается в следующем.

Процесс реконфигурации (деградации или восстановления) структуры БС МКА будем соотносить с операциями удаления ($P_j = 0$) или восстановления ($P_j = 1$) ФЭ БС из некоторого множества $\{P_{j_1}, P_{j_2}, \dots, P_{j_N}\} = \tilde{P} \subseteq \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$. В процессе удаления (восстановления) ФЭ структура БС МКА может находиться в одном из своих промежуточных состояний s_α , характеризующемся параметрическим геномом $\tilde{\chi}_\alpha(\beta_1, \dots, \beta_m)$. Одну из возможных траекторий реконфигурации структуры БС МКА в процессе возникновения отказов (восстановления) можно описать следующей цепочкой переходов [16]

$$\tilde{\chi}_{\alpha_0}(\beta_1, \dots, \beta_m) \xleftarrow{P_{j_1}} \tilde{\chi}_{\alpha_1}(\beta_1, \dots, \beta_m) \xleftarrow{P_{j_2}} \dots \xleftarrow{P_{j_N}} \tilde{\chi}_{\alpha_N}(\beta_1, \dots, \beta_m),$$

где $\tilde{\chi}_{\alpha_0}(\beta_1, \dots, \beta_m) = \tilde{\chi}_0(\beta_1, \dots, \beta_m)$ - начальное состояние, $\tilde{\chi}_{\alpha_N}(\beta_1, \dots, \beta_m) = \tilde{\chi}_f(\beta_1, \dots, \beta_m)$ - финальное состояние, $\tilde{\chi}(\beta_1, \dots, \beta_m) \xleftarrow{P_j} \tilde{\chi}_\alpha(\beta_1, \dots, \beta_m)$ - непосредственно связанные структурные состояния БС s и s_α при отказе (восстановлении) некоторого ФЭ P_j . Множество всех структурных состояний, непосредственно связанных с состоянием $\tilde{\chi}(\beta_1, \dots, \beta_m)$, обозначим $X(\tilde{\chi}(\beta_1, \dots, \beta_m))$.

Для построения оптимистической (пессимистической) траектории реконфигурации БС МКА требуется решить следующие оптимизационные задачи (9) [20,21].

$$\sum_{j=0}^N F_{\text{над}}^{\alpha_j} \rightarrow \max(\min) \begin{matrix} \tilde{\chi}_{\alpha_j}(\beta_1, \dots, \beta_m) \in X(\tilde{\chi}_{\alpha_{j-1}}(\beta_1, \dots, \beta_m)) \\ \tilde{\chi}_{\alpha_0}(\beta_1, \dots, \beta_m) = \tilde{\chi}_0(\beta_1, \dots, \beta_m), \\ \tilde{\chi}_{\alpha_N}(\beta_1, \dots, \beta_m) = \tilde{\chi}_f(\beta_1, \dots, \beta_m), \\ \{P_{j_1}, P_{j_2}, \dots, P_{j_N}\} = \tilde{P} \end{matrix} . \quad (9)$$

Здесь в качестве $F_{над}^{\alpha_j}$ могут использоваться следующие интегральные

показатели структурно-функциональной надежности БС МКА $m \cdot \int_0^{1/m} F_*(\tilde{\chi}_{p\alpha_j}(\beta))d\beta,$

$$\int_0^1 F_*(\tilde{\chi}_{c\alpha_j}(\beta))d\beta, m! \cdot \iiint_{\substack{\beta_1+\dots+\beta_m \leq 1 \\ 0 \leq \beta_i \leq 1, i=1, \dots, m}} F_*(\tilde{\chi}_{p\alpha_j}(\beta_1, \dots, \beta_m))d\beta_1 d\beta_2 \dots d\beta_m,$$

$$\int_0^1 \int_0^1 \dots \int_0^1 F_*(\tilde{\chi}_{c\alpha_j}(\beta_1, \dots, \beta_m))d\beta_1 d\beta_2 \dots d\beta_m.$$

В работе [5] представлен комбинированный метод случайного направленного поиска вариантов решения поставленной задачи и разработан алгоритм, реализующий приведенный метод и позволяющий находить как оптимистическую и пессимистическую траекторию, так и промежуточные, случайным образом построенные траектории.

На рисунке 1 представлена траектория $\mu^{(k)}$ реконфигурации структуры БС МКА, где по оси абсцисс указаны промежуточные состояния БС МКА, а по оси ординат - значения структурно-функциональной надежности БС в этих состояниях. Площадь S_0 , равная $1 \cdot N$, пропорциональна максимальному суммарному показателю структурно-функциональной надежности функционирования БС МКА при отказе N ФЭ. Вычисленная площадь

$S^k = \sum_{j=0}^{N-1} \frac{F_{над}^{\alpha_j(k)} + F_{над}^{\alpha_{j+1}(k)}}{2}$ равна суммарной структурно-функциональной надежности

функционирования БС МКА в процессе реконфигурации в рамках сценария $\mu^{(k)}$

Тогда отношение указанных площадей $J^k = S^k / S_0 = S^k / N$ позволяет количественно

оценить *показатель структурно-функциональной живучести БС МКА* в процессе его структурной реконфигурации по сценарию $\mu^{(k)}$.

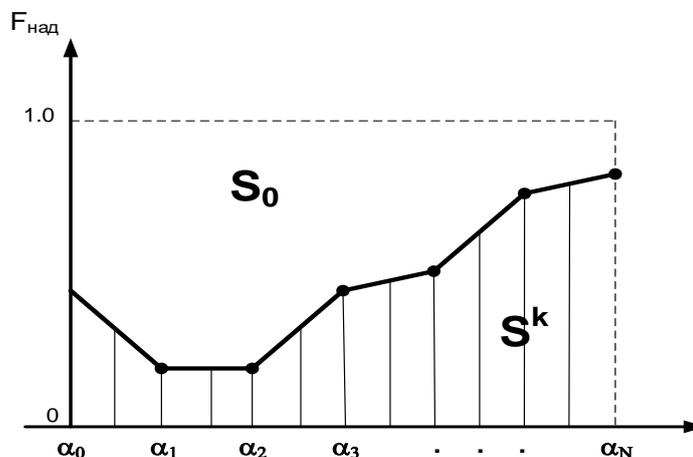


Рис. 1 - Графическая интерпретация вычисления значений обобщенного показателя структурно-функциональной живучести БС МКА вдоль траектории реконфигурации

В результате проведения серии из M экспериментов для построения произвольных трасс реконфигурации вычисляется среднее значение показателя

структурно-функциональной живучести $J^0 = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M J^k$.

Тогда [11] максимальное значение J^{\max} *обобщенного показателя структурно-функциональной живучести* БС МКА J будет достигаться на оптимистическом сценарии реконфигурации БС МКА, а минимальное значение J^{\min} - на пессимистическом. Можно утверждать, что реальные значения J будут лежать в интервале $[J^{\min}, J^{\max}]$ и наиболее ожидаемое значение будет равно J^0 . При этом значения показателя J можно представлять нечетким треугольным числом (a, α, β) , где $a = J^0$, $\alpha = J^0 - J^{\min}$, $\beta = J^{\max} - J^0$.

Экспериментальные исследования системы управления движением МКА при решении задач ориентации в различных режимах функционирования

В качестве примера рассмотрим систему управления движением (СУД) МКА «Аист-2Д» [13,22,23]. Для исследования структурно-функциональной надёжности воспользуемся результатами из работы [12]. В работе [12] были рассмотрены 4 режима управления угловым движением: гашения угловых скоростей (ГУС); одноосной солнечной ориентации (ОСО); трёхосной ориентации в орбитальной системе координат (ОСК); проведения экспериментов (ПЭ). Кроме того, были разработаны СФЦ трех вариантов проектных решений построения СУД МКА, учитывающих ориентацию осей чувствительности угловой скорости для четырёх одноосных измерителей угловой скорости (ОИУС) [10]: кубическая конфигурация – «Куб» (три ОИУС расположены соосно осям МКА и четвёртый по диагонали куба), коническая конфигурация с одним осевым измерителем – «Конус+ось» (три ОИУС расположены в плоскостях, образованных высотами граней тетраэдра, а один ОИУС сонаправлен с осью МКА), исключительно коническая конфигурация – «Конус» (все оси расположены на плоскостях, образованных высотами граней пирамиды). В соответствии с приведёнными схемами расположения приборов ОИУС и логикой работы СУД для различных режимов МКА [12] СФЦ СУД для

выполнения задачи определения ориентации МКА будут иметь вид, представленный на рисунках 2, 3 и 4.

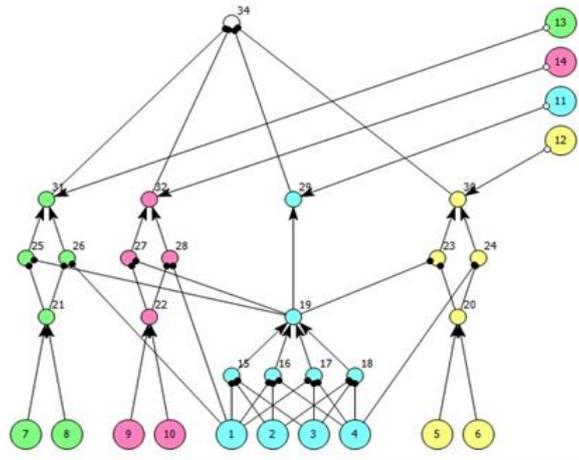


Рис.2 – СФЦ СУД для конфигурации «Куб»

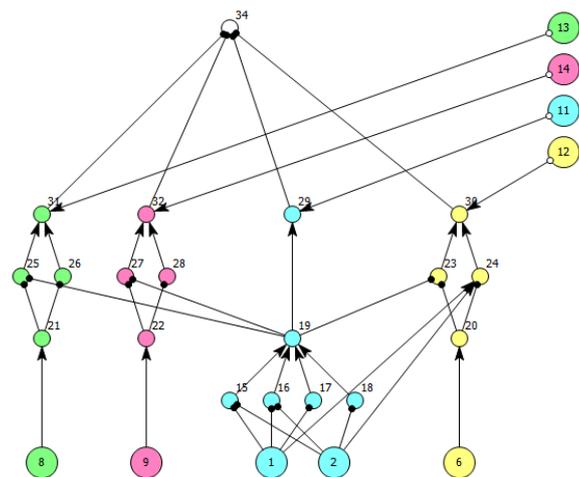


Рис.3 – СФЦ СУД для конфигурации «Конус+ось»

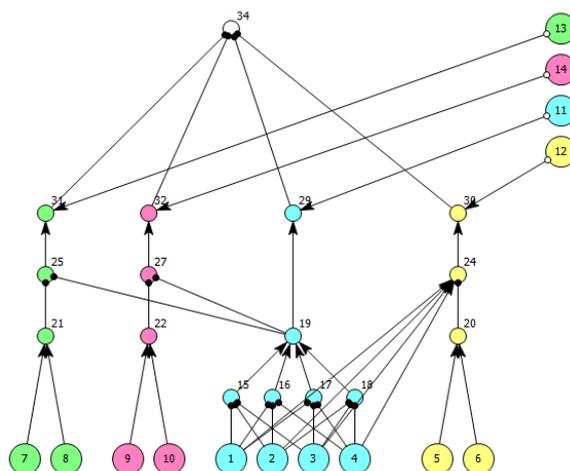


Рис.4 – СФЦ СУД для конфигурации «Конус»

Далее, используя программный комплекс логико–вероятностного моделирования «Арбитр» [18], получаем вероятностные полиномы (ВП) данных СФЦ с учетом того, что режимы (вершины 11, 12, 13, 14) могут представлять собой группу несовместных событий (т.е. задействуются последовательно, раздельно) или не обладать этим свойством. Например, для СФЦ СУД с конфигурацией «Куб», где режимы могут задействоваться совместно, ВП состоит из 159 членов. Фрагмент ВП приведен ниже:

$$\begin{aligned}
 & P1 Q2 P3 P4 Q5 Q6 Q7 Q8 Q9 P10 P12 P13 + \\
 & + P1 Q2 P3 P4 Q5 Q6 Q7 P8 Q9 Q10 P12 P14 + \\
 & + Q1 P2 P3 P4 Q5 Q6 Q7 Q8 Q9 P10 P12 P13 + \\
 & + P1 P2 Q3 P4 Q5 Q6 Q7 Q8 Q9 P10 P12 P13 + \\
 & + P1 P2 Q3 P4 Q5 Q6 Q7 P8 Q9 Q10 P12 P14 + \\
 & + Q1 P2 P3 P4 Q5 Q6 Q7 P8 Q9 Q10 P12 P14...
 \end{aligned}$$

Исходными данными для оценивания структурно-функциональной живучести СУД МКА с учетом многорежимного функционирования являются

вероятностный полином такой системы, учитывающий совместное или раздельное (параллельное или последовательное) задействование режимов, а также равноценность задействования режимов функционирования.

Проведем вычисления значений структурно-функциональной живучести на примере СФЦ СУД «Куб».

Случай 1: несовместные режимы управления угловым движением.

Траектории реконфигурации СУД МКА для варианта, учитывающего равноценную интенсивность задействования несовместных режимов управления угловым движением и неоднородность структуры СУД МКА, приведены на рисунке 5. По оси абсцисс указываются номера ФЭ, отказ которых привел к изменению обобщенной структурно-функциональной надежности согласно оптимистического (произвольного; пессимистического) сценария [14,15].

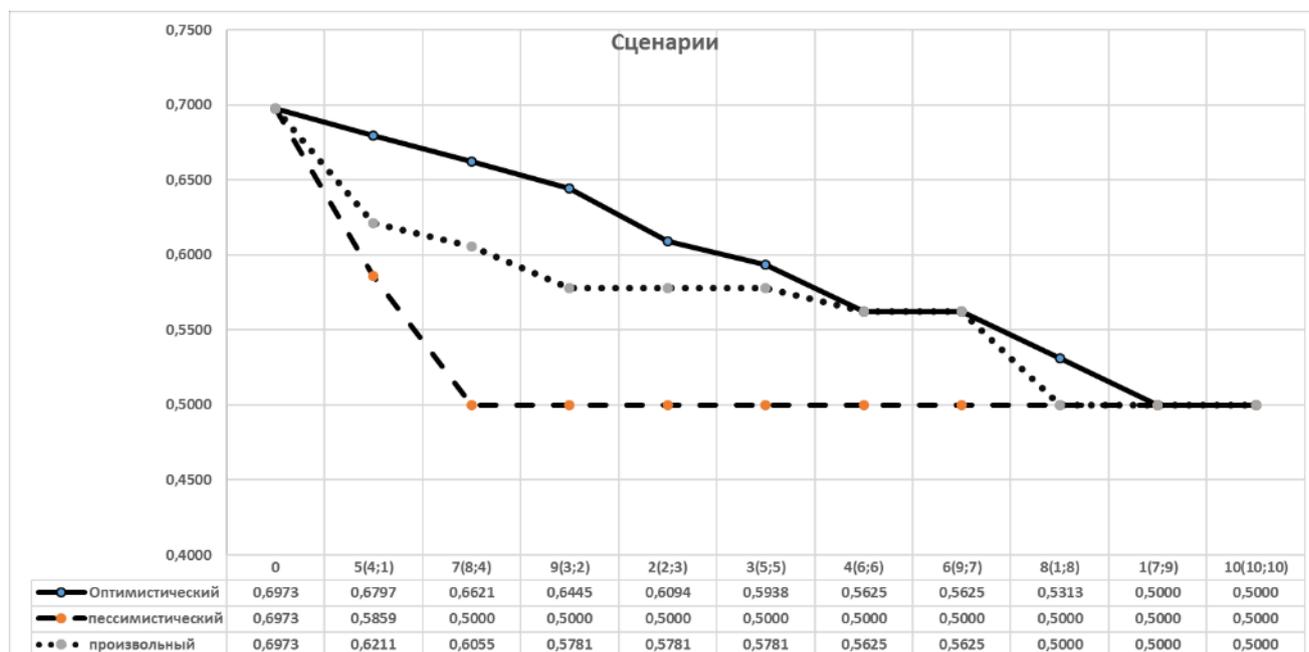


Рис.5 – Сценарии реконфигурации СУД МКА «Куб»

(структура неоднородна, режимы несовместны и равноценны)

Проведенный расчет структурно-функциональной живучести для рассматриваемого варианта (равноценная интенсивность несовместных режимов и неоднородность структуры СУД МКА) дал следующие результаты: максимальное значение $J^{\max} = 0,5944$, минимальное значение - $J^{\min} = 0,5185$, а живучесть приведенного произвольного сценария равна $J^k = 0,5685$. Для нахождения наиболее ожидаемого значения J^0 проведена серия из 1000 экспериментов. В результате проведенных экспериментов получена следующая оценка $J^0 = 0,5602$. Тогда обобщенное значение показателя структурно-функциональной живучести СУД МКА рассматриваемого варианта, представленное нечетким треугольным числом, имеет следующий вид: $(a, \alpha, \beta) = (0.5602, 0.0417, 0.0342)$, где $a = 0.5602$, $\alpha = 0.5602 - 0.5185 = 0.0417$, $\beta = 0.5944 - 0.5602 = 0.0342$.

Результаты значений показателя структурно-функциональной живучести СУД МКА с конфигурацией ОИУС «Куб» для других вариантов интенсивности задействования режимов управления угловым движением и однородности структуры СУД МКА представлены в таблице 1 (в ячейках таблицы 1 приведены значения J^{\min}, J^0, J^{\max}).

Случай 2: совместные режимы управления угловым движением.

В данном случае траектории реконфигурации СУД МКА для равноценной интенсивности задействования совместных режимов управления угловым движением и неоднородности структуры СУД МКА, приведены на рисунке 6.

Таблица 1.

Структурно-функциональная живучесть определения ориентации МКА для
конфигурации «Куб» (случай 1)

Интенсивность задействования несовместных режимов	Конфигурация ОИУС «Куб» (пессимистический, ожидаемый, оптимистический сценарий воздействия)	
	Однородная структура	Неоднородная структура
Равноценная	0.5253; 0.5849; 0.6198	0.5185; 0.5602; 0.5944
Неравноценная	0.2405; 0.3397; 0.3917	0.2295; 0.2986; 0.3511

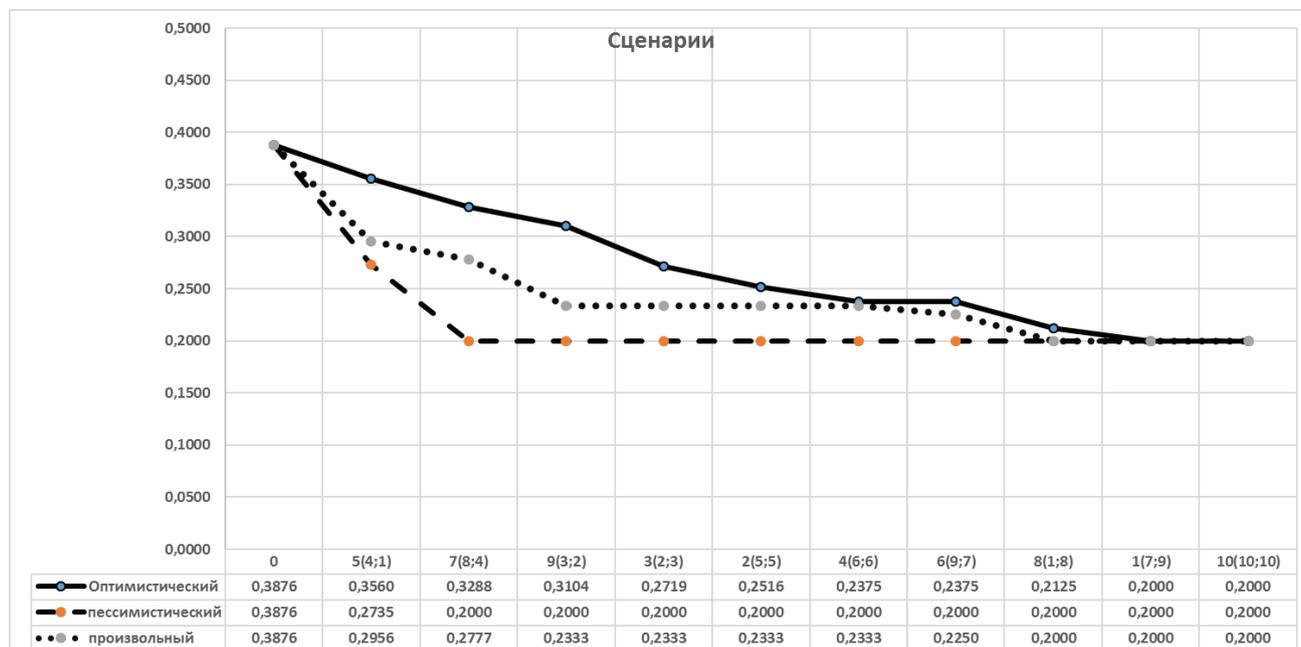


Рис.6 – Сценарии реконфигурации СУД МКА «Куб»

(структура неоднородна, режимы совместны и равноценны)

Значения показателя структурно-функциональной живучести СУД МКА с конфигурацией ОИУС «Куб» для рассматриваемого случая приведены в табл. 2.

Таблица 2.

Структурно-функциональная живучесть определения ориентации МКА для конфигурации «Куб» (случай 2)

Интенсивность задействования совместных режимов	Конфигурация ОИУС «Куб» (пессимистический, ожидаемый, оптимистический сценарий воздействия)	
	Однородная структура	Неоднородная структура
Равноценная	0.2332; 0.2704; 0.3319	0.2163; 0.2411; 0.2700
Неравноценная	0.1022; 0.1521; 0.2215	0.0837; 0.1195; 0.1550

В ходе проведенного исследования было установлено, что живучесть СУД МКА, кроме однородности и неоднородности структуры, существенно зависит от способов задействования режимов ориентации. Так при несовместном использовании равноценных режимов живучесть СУД МКА на $\approx 22-29\%$ выше, чем при использовании неравноценных режимов. Живучесть СУД МКА повышается на $\approx 12\%$ при совместном использовании равноценных режимов в отличие от использования неравноценных режимов.

Заключение

Отличительная черта предлагаемого нами метода состоит в том, что на единой методологической основе (оригинальная концепция параметрического генома структурного построения сложных объектов) возможно проводить исследование структурно-функциональных свойств и осуществлять оперативное вычисление интервальных, оптимистических и пессимистических оценок показателей структурно-функциональной живучести как однородных и неоднородных структур БС МКА, так и различные варианты задействования режимов функционирования сложных объектов.

Введена серия новых показателей структурно-функциональной надежности и живучести, отражающих совместное и раздельное использование режимов функционирования с различной интенсивностью. Предложенные показатели структурно-функциональной живучести БС МКА позволяют провести анализ живучести различных конфигураций БС МКА.

Список источников

1. Севастьянов Н.Н., Андреев А.И. Основы управления надежностью космических аппаратов с длительными сроками эксплуатации. - Томск: Изд. дом Томского государственного университета, 2015. - 265 с.
2. Колодежный Л.П., Чернодаров А.В. Надежность и техническая диагностика. - М.: ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, 2010. - 452 с.

3. Бородин В.В. Оценка надежности обслуживаемых устройств орбитальной космической станции // Труды МАИ. 2012. № 58. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=33036>
4. Быков А.П., Пиганов М.Н. Прогнозирование показателей качества бортовых радиоэлектронных устройств // Труды МАИ. 2021. № 116. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=121012>. DOI: [10.34759/trd-2021-116-05](https://doi.org/10.34759/trd-2021-116-05)
5. Manuilov Ju.S., Pavlov A.N., Pavlov D.A., Slin'ko A.A. The Technique of Informational Interaction Structural-Parametric Optimization of an Earth's Remote Sensing Small Spacecraft Cluster // Cybernetics and Algorithms in Intelligent Systems. Proceedings of 7th Computer Science On-line Conference, 2018, vol. 3, pp. 155 - 166.
6. 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: <http://trudymai.ru/published.php?ID=109557>. DOI: [10.34759/trd-2019-108-16](https://doi.org/10.34759/trd-2019-108-16)
7. Райкунова Г.Г. Ионизирующие излучения космического пространства и их воздействие на бортовую аппаратуру космических аппаратов. - М.: Физматлит, 2013. - 256 с.
8. Ярмолик В.Н., Вашинко Ю.Г. Физически неклонлируемые функции // Информатика. 2011. № 2. С. 92 – 103.
9. Алешин Е.Н., Зиновьев С.В., Копкин Е.В., Осипенко С.А., Павлов А.Н., Соколов Б.В. Системный анализ организационно-технических систем космического назначения. - СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2018. - 357 с.

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. DOI:[10.1016/j.ast.2015.09.017](https://doi.org/10.1016/j.ast.2015.09.017)
11. Павлов А.Н., Воротягин В.Н., Слинько А.А., Методика оценивания структурно-функциональной живучести бортовых систем малых космических аппаратов в условиях возникновения нерасчетных полетных ситуаций // Информация и космос. 2019. № 2. С. 139 – 147.
12. Павлов А.Н., Воротягин В.Н., Кулаков А.Ю., Умаров А.Б. Исследование структурно-функциональной надёжности малых космических аппаратов при решении задач ориентации // Информатизация и связь. 2020. № 5. С. 132 - 140.
13. Филатов А.В., Ткаченко И.С., Тюгашев Е.В., Сопченко Е.В. Математическое обеспечение системы управления движением малого космического аппарата // Материалы Международной конференции и молодежной школы «Информационные технологии и нанотехнологии» (Самара, 29 июня-01 июля 2015). – Самара: Самарский научный центр РАН, 2015. С. 290-294.
14. Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. - М.: Наука, 2006. - 410 с.
15. Земляков С.Д., Рутковский В.Ю., Силаев А.В. Реконфигурация систем управления летательными аппаратами при отказах // Автоматика и телемеханика. 1996. № 1. С. 3 - 20.

16. Павлов А.Н. Комплексное моделирование структурно-функциональной реконфигурации сложных объектов // Труды СПИИРАН. 2013. № 5. С. 143 - 168.
17. Pavlov A.N., Pavlov D.A., Vorotyagin V.N., Umarov A.B. Structural and functional analysis of supply chain reliability in the presence of demand fluctuations // Proceedings of Models and Methods for Researching Information Systems in Transport-2020, 2020, vol. 2803, pp. 61 – 66.
18. Поленин В.И., Рябинин И.А., Свирин С.К., Гладкова И.А. Применение общего логико-вероятностного метода для анализа технических, военных организационно-функциональных систем и вооруженного противоборства: монография. - СПб.: РАЕН, 2011. - 416 с.
19. Акимов Е.В., Кузнецов М.Н. Вероятностные математические модели для оценки надежности беспроводных сенсорных сетей // Труды МАИ. 2010. № 40.
URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=22873>
20. Калинов М.И., Родионов В.А. Обоснование выбора рационального варианта применения малых космических аппаратов при отказах отдельных элементов их бортовых систем // IX Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности (ИММОД-2019): сборник трудов (Екатеринбург, 16-18 октября 2019). – Екатеринбург: Изд-во Уральского государственного педагогического университета, 2019. С. 434 – 438.
21. Заведеев А.И. Разработка алгоритмов для отказоустойчивых систем управления аэрокосмическими летательными аппаратами // Труды VIII

Труды МАИ. 2021.Выпуск № 120

Trudy MAI. 2021.Issues no.120

международного научно-технического семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации». – М.: Изд-во МАИ, 1999. С. 344 - 345.

22. Кирилин А.Н., Ахметов Р.Н., Шахматов Е.В., Ткаченко С.И., Бакланов А.И. и др. Опыт-технологический малый космический аппарат «АИСТ-2Д». - Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2017. - 324 с.

23. Шипов М.Г. Гашение угловых скоростей КА «Аист-2Д» с использованием системы сброса кинетического момента // Вестник Самарского университета. Авиационная и ракетно-космическая техника технологии и машиностроение. 2019. № 2. Т. 18. С. 121 - 127. DOI: [10.18287/2541-7533-2019-18-2-121-127](https://doi.org/10.18287/2541-7533-2019-18-2-121-127)

References

1. Sevast'yanov N.N., Andreev A.I. *Osnovy upravleniya nadezhnost'yu kosmicheskikh apparatov s dlitel'nymi srokami ekspluatatsii* (Reliability Management Fundamentals of Spacecraft with Long Service Life: A Study Guide), Tomsk, Izd. dom Tomskogo gosudarstvennogo universiteta, 2015, 265 p.

2. Kolodezhnyi L.P., Chernodarov A.V. *Nadezhnost' i tekhnicheskaya diagnostika* (Reliability and technical diagnostics), Moscow, VVA im. prof. N.E. Zhukovskogo i Yu.A. Gagarina, 2010, 452 p.

3. Borodin V.V. *Trudy MAI*, 2012, no. 58. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=33036>

4. Bykov A.P., Piganov M.N. *Trudy MAI*, 2021, no. 116. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=121012>. DOI: [10.34759/trd-2021-116-05](https://doi.org/10.34759/trd-2021-116-05)
5. Manuilov Ju.S., Pavlov A.N., Pavlov D.A., Slin'ko A.A. The Technique of Informational Interaction Structural-Parametric Optimization of an Earth's Remote Sensing Small Spacecraft Cluster, *Cybernetics and Algorithms in Intelligent Systems. Proceedings of 7th Computer Science On-line Conference*, 2018, vol. 3, pp. 155 - 166.
6. Vasil'kov Yu.V., Timoshenko A.V., Sovetov V.A., Kirmel' A.S. *Trudy MAI*, 2019, no. 108. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=109557>. DOI: [10.34759/trd-2019-108-16](https://doi.org/10.34759/trd-2019-108-16)
7. Raikunova G.G. *Ioniziruyushchie izlucheniya kosmicheskogo prostranstva i ikh vozdeistvie na bortovuyu apparaturu kosmicheskikh apparatov* (Ionizing radiation from outer space and its impact on the onboard equipment of spacecraft), Moscow, Fizmatlit, 2013, 256 p.
8. Yarmolik V.N., Vashinko Yu.G. *Informatika*, 2011, no. 2, pp. 92 – 103.
9. Aleshin E.N., Zinov'ev S.V., Kopkin E.V., Osipenko S.A., Pavlov A.N., Sokolov B.V. *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, 357 p.
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. DOI: [10.1016/j.ast.2015.09.017](https://doi.org/10.1016/j.ast.2015.09.017)

11. Pavlov A.N., Vorotyagin V.N., Slin'ko A.A., *Informatsiya i kosmos*, 2019, no. 2, pp. 139 – 147.

12. Pavlov A.N., Vorotyagin V.N., Kulakov A.Yu., Umarov A.B. *Informatizatsiya i svyaz'*, 2020, no. 5, pp. 132 - 140.

13. Filatov A.V., Tkachenko I.S., Tyugashev E.V., Sopchenko E.V. *Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii i molodezhnoi shkoly "Informatsionnye tekhnologii i nanotekhnologii"*, Samara, Samarskii nauchnyi tsentr RAN, 2015, pp. 290 - 294.

14. Okhtilev M.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M. *Intellektual'nye tekhnologii monitoringa i upravleniya strukturnoi dinamiko slozhnykh tekhnicheskikh ob"ektov* (Intelligent technologies for monitoring and controlling structural dynamics of complex technical objects), Moscow, Nauka, 2006, 410 p.

15. Zemlyakov S.D., Rutkovskii V. Yu., Silaev A.V. *Avtomatika i telemekhanika*, 1996, no. 1, pp. 3 - 20.

16. Pavlov A.N. *Trudy SPIIRAN*, 2013, no. 5, pp. 143 - 168.

17. Pavlov A.N., Pavlov D.A., Vorotyagin V.N., Umarov A.B. Structural and functional analysis of supply chain reliability in the presence of demand fluctuations, *Proceedings of Models and Methods for Researching Information Systems in Transport -2020*, 2020, vol. 2803, pp. 61 – 66.

18. Polenin V.I., Ryabinin I.A., Svirin S.K., Gladkova I.A. *Primenenie obshchego logiko-veroyatnostnogo metoda dlya analiza tekhnicheskikh, voennykh organizatsionno-funktsional'nykh sistem i vooruzhennogo protivoborstva: monografiya* (The general logical-probabilistic method application for the analysis of

Труды МАИ. 2021.Выпуск № 120

Trudy MAI. 2021.Issues no.120

technical, military organizational-functional systems and armed confrontation: monograph), Saint Petersburg, RAEN, 2011, 416 p.

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

20. Kalinov M.I., Rodionov V.A. *IX Vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya po imitatsionnomu modelirovaniyu i ego primeneniyu v nauke i promyshlennosti (IMMOD-2019): sbornik trudov*, Ekaterinburg, Izd-vo Ural'skogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta, 2019, pp. 434 – 438.

21. Zavedeev A.I. *Trudy VIII mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo seminara "Sovremennye tekhnologii v zadachakh upravleniya, avtomatiki i obrabotki informatsii"*, Moscow, Izd-vo MAI, 1999, pp. 344 – 345.

22. Kirilin A.N., Akhmetov R.N., Shakhmatov E.V., Tkachenko S.I., Baklanov A.I. et al. *Opytno-tekhnologicheskii malyy kosmicheskii apparat "AIST-2D"* (The "AIST-2D" experimental and technological small spacecraft), Samara, Izd-vo SamNTs RAN, 2017, 324 p.

23. Shipov M.G. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aviatsionnaya i raketno-kosmicheskaya tekhnika tekhnologii i mashinostroenie*, 2019, no. 2, vol. 18, pp. 121 - 127. DOI: [10.18287/2541-7533-2019-18-2-121-127](https://doi.org/10.18287/2541-7533-2019-18-2-121-127)

Статья поступила в редакцию 25.07.2021; одобрена после рецензирования 10.08.2021; принята к публикации 22.10.2021.

The article was submitted 25.07.2021; approved after reviewing 10.08.2021; accepted for publication 22.10.2021.