

МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МНОГОСПУТНИКОВОЙ ГРУППИРОВКИ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

А. Н. Павлов^{1,2}, Д. Ю. Колесник^{1*}, А. В. Гордеев¹

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

* vka@mil.ru

² Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Сформулирована актуальность научной задачи повышения показателей надежности применения многоспутниковой группировки малых космических аппаратов (МКА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) при обслуживании территориально-распределенных объектов наблюдения. Предложена методика оперативной смены конфигурации функциональных элементов бортовых систем МКА ДЗЗ, участвующих в детальном наблюдении объекта, с учетом рационального расхода системного технического ресурса группировки в целях повышения показателей надежности ее применения. В качестве основной бортовой системы рассмотрена система управления движением МКА при реализации режимов точной ориентации и перенацеливания. Приведено описание входных данных для реализации процесса планирования оперативной смены конфигурации функциональных элементов бортовой аппаратуры. Процесс выбора конфигурации состоит из двух стадий: построения схемы функциональной целостности и формирования вероятностного полинома успешного функционирования системы управления движением и решения задачи выбора оптимальной конфигурации с учетом текущей наработки на отказ функциональных элементов системы. Приведены результаты вычислительных экспериментов. Разработанная методика доведена до уровня практического применения, позволяющего обеспечить равномерный расход системного технического ресурса группировки МКА при целевом применении.

Ключевые слова: многоспутниковая группировка, дистанционное зондирование Земли, территориально распределенный объект наблюдения, технический ресурс, выбор конфигурации бортового комплекса

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00706.

Ссылка для цитирования: Павлов А. Н., Колесник Д. Ю., Гордеев А. В. Методика повышения надежности применения многоспутниковой группировки малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 11. С. 975–983. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-11-975-983.

TECHNIQUE FOR IMPROVING THE RELIABILITY OF THE APPLICATION OF MULTI-SATELLITE GROUP OF SMALL SPACECRAFTS FOR REMOTE SENSING OF THE EARTH

A. N. Pavlov^{1,2}, D. Yu. Kolesnik^{1*}, A. V. Gordeev¹

¹ A. F. Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia

* vka@mil.ru

² St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg, Russia

Abstract. The relevance of the scientific task of increasing the reliability of the use of a multi-satellite grouping of small spacecrafts for remote sensing of the Earth in the maintenance of geographically distributed observation objects is formulated. A method of operational change of configuration of functional elements of onboard systems of small spacecraft remote sensing equipment involved in detailed observation of an object is proposed, taking into account rational consumption of the system technical resource of the group in order to improve the reliability indicators of its application. The motion control system of small spacecraft during implementation of precise orientation and retargeting modes is considered as the main on-board system. A description of the input data for implementation of the process of planning operational change of configuration of functional elements of on-board equipment is given. The process of configuration selection consists of two stages: construction of a functional integrity scheme and formation of a probabilistic polynomial of successful operation of the motion control system and solution of the problem of selection of the optimal configuration taking into account the current mean time between failures of the functional elements of the system; the results of computational experiments are presented. The developed method is brought to the level of practical application, allowing for uniform consumption of the system technical resource of the small spacecraft group during its intended use.

Keywords: multi-satellite grouping, remote sensing of the Earth, geographically distributed object of observation, technical resource, choice of onboard complex configuration

Acknowledgments: the study was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 24-29-00706.

For citation: Pavlov A. N., Kolesnik D. Yu., Gordeev A. V. Technique for improving the reliability of the application of multi-satellite group of small spacecrafts for remote sensing of the Earth. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 11. P. 975–983 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-11-975-983.

Введение. Для реализации автономного управления многоспутниковой системой в целом и отдельными малыми космическими аппаратами дистанционного зондирования Земли (МКА ДЗЗ) решение необходимых задач должно выполняться на борту МКА. К наиболее значимым задачам относятся: маршрутизация передачи данных в коммуникационной сети многоспутниковой системы; распределение заявок на съемку между МКА на основе информационного взаимодействия в соответствии с предлагаемыми схемами протоколов, а также адаптивная коррекция плана съемок при изменении состояния МКА и перераспределение заявок между МКА. При этом следует отметить, что для обоснованного и корректного решения перечисленных задач требуется осуществить не только автономное планирование съемок по заявкам для каждого МКА, но и оценить потенциальные возможности конфигурирования одной из важнейших бортовых систем — системы управления движением (СУД) — в условиях плановой работы [1–3]. В настоящее время существует необходимость в прогнозировании расхода системного технического ресурса таких систем. Данный аспект обусловлен конкретными задачами оперативного планирования сложных организационно-технических комплексов. Потребность в оперативном планировании использования функциональных элементов (ФЭ) бортовой аппаратуры вызвана необходимостью повышения надежности применения многоспутниковой группировки (МСГ) МКА для увеличения срока ее активного существования при выполнении целевых задач. Методика повышения надежности применения МСГ МКА ДЗЗ предложена в настоящей статье.

Основные аспекты методики. Результаты современных исследований [4–7] в области систем управления движением МКА показывают, что особенностью данных систем является качественное изменение в технологии управления, направленное на увеличение возможностей системы.

Как правило, структурный анализ функционирования многорежимных сложных объектов начинается с построения схемы функциональной целостности (СФЦ), которая позволяет корректно представлять как традиционные виды структурных схем, так и принципиально новый класс немонотонных структурных моделей [8]. При разработке СФЦ графически описываются логические условия реализации собственных функций элементов и подсистем объекта, а также реализации режимов функционирования для достижения целей управления. При этом, с одной стороны, взаимосвязи функциональных вершин отражают структуру СУД, а с другой стороны, интенсивность реализации режимов и их несовместное и/или совместное функционирование отражает структуру технологии управления системой. Следует отметить, что при реализации разработанного плана обслуживания территориально-распределенных объектов наблюдения (далее — объект), как правило, в СУД МКА с большей интенсивностью задействуются два режима ориентации (точная ориентация и перенацеливание). Причем зная план обслуживания объекта для каждого МКА группировки, можно оценить интенсивность использования этих режимов ориентации. Так, например, схема функциональной целостности взаимодействия чувствительных элементов и исполнительных органов СУД МКА [8] при выполнении режимов точной ориентации и перенацеливания оптической оси представлена на рис. 1, где приняты следующие обозначения: 1–4 — блок одноосных измерителей угловой скорости (ОИУС); 5–8 — блок управления двигателями-маховиками (УДМ); 9 — система солнечного наведения (ССН); 10, 11 — блок приборов ориентации на Землю (ПОЗ); 12, 13 — блок ориентации звездных датчиков (ОЗД); 14, 15 — блок магнитометров; 16–18 — блок электромагнитов; 19, 20 — режи-

мы ориентации; остальные вершины обозначают конфигурацию функциональных элементов бортовой аппаратуры; ВБР — вероятность безотказной работы.

Следует отметить, что для реализации рассматриваемых в работе режимов ориентации можно использовать приведенные в табл. 1 варианты конфигурации функциональных элементов СУД МКА ДЗЗ, которые отражены в СФЦ (см. рис. 1).

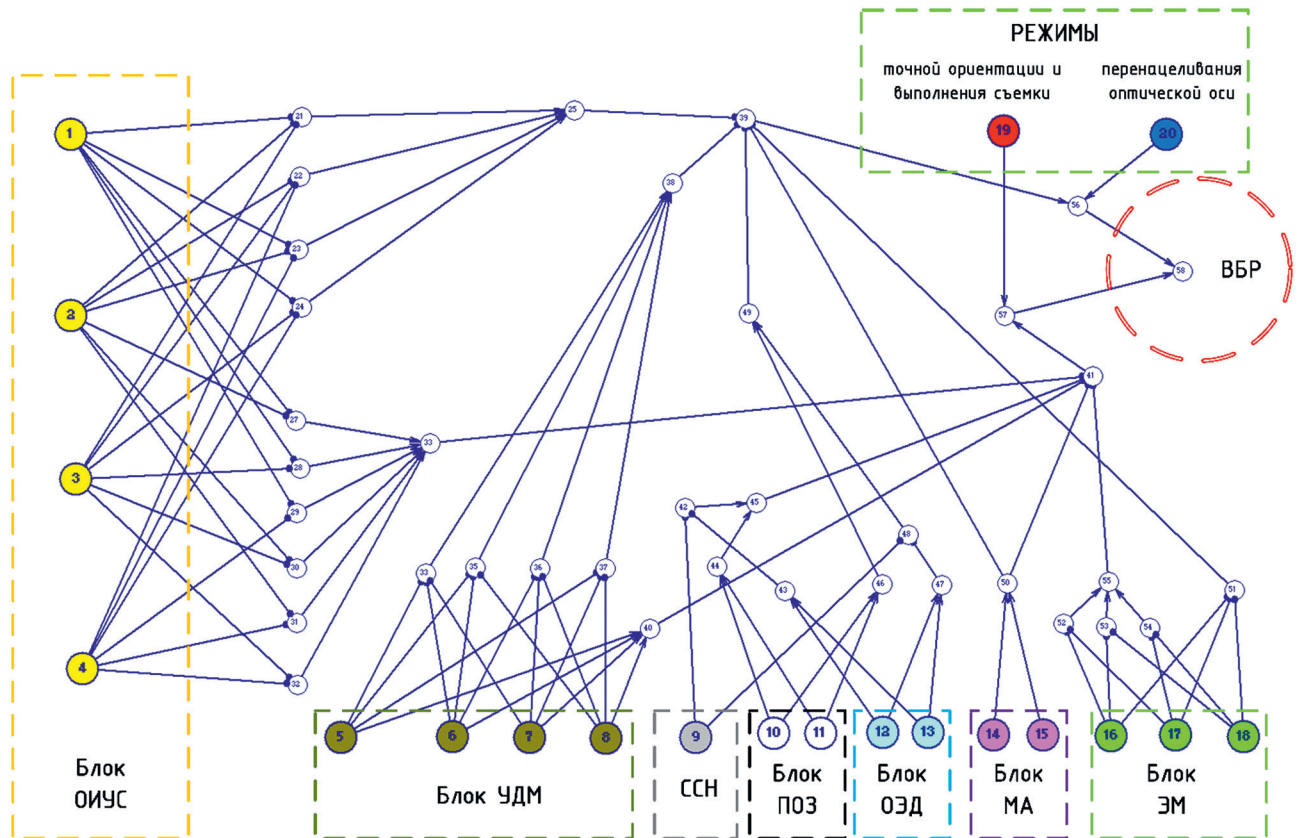


Рис. 1

Таблица 1

Тип элемента Номер элемента	ОИУС				УДМ				ССН	ПОЗ		ОЗД		МА		ЭМ		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Режим перенацеливания оптической оси	1 из 4				2 из 4				1	1 из 2		1 из 2		1 из 2		2 из 3		
Режим точной ориентации	3 из 4				3 из 4				1	1 из 2		1 из 2		1 из 2		1	1	1

Для разработанной схемы СУД МКА с использованием программного комплекса (ПК) „Арбитр“ [9, 10] получен вероятностный полином ее успешного функционирования:

$$\mathfrak{R}(P_1, P_2, \dots, P_n, P_{n+1}, \dots, P_{n+m}), \quad (1)$$

где $P_i, i = \overline{1, n}$ — вероятность безотказной работы ФЭ СУД МКА, $P_{n+1}, i = \overline{1, m}$, — интенсивность реализации режимов ориентации системы.

Обозначим интенсивность реализации режимов ориентации СУД МКА через $\alpha_i = P_{n+1}, i = \overline{1, m}$. Следует отметить, что при наличии групп несовместных или совместных событий в СФЦ исследуемой системы [11, 12] эти события автоматически учитываются при построении логических и вероятностных моделей. Так, для учета несовместных событий в ПК „Арбитр“ вводятся следующие исходные данные: признаки объединения множеств элементов в группы

несовместных событий; признаки исходов (прямой или инверсный) элементарных событий; статические вероятностные параметры событий, задаваемые с учетом нормирующего условия (для рассматриваемого примера: $P_{19} + P_{20} \leq 1$ или $\alpha_1 + \alpha_2 \leq 1$).

Таким образом, в вероятностный полином (1) по сути заложены экспертные знания специалистов в данной предметной области. Для того чтобы использовать эти знания, необходимо представить полином в удобном для программирования в бортовом вычислителе виде, т.е. создать своего рода примитивную базу знаний и библиотеку функций для работы с базой знаний, основанной на скрытой в полиноме (1) информации.

Вероятностный полином, описывающий структуру бортовой системы управления движением типового МКА ДЗЗ, представленной на рис. 1 в форме схемы функциональной целостности (см. рис. 1), имеет следующий вид (ниже представлен фрагмент полинома, весь полином состоит из 626 слагаемых):

$$\begin{aligned} & \dots + P_1 P_{10} P_{14} P_{16} P_{17} P_{19} P_{20} P_5 P_6 Q_{11} Q_{15} Q_{18} Q_2 Q_3 Q_4 Q_7 Q_8 + \\ & \dots + P_1 P_{10} P_{14} P_{16} P_{17} P_{19} P_{20} P_5 P_7 Q_{11} Q_{15} Q_{18} Q_2 Q_3 Q_4 Q_6 Q_8 + \\ & \dots + P_1 P_{10} P_{14} P_{16} P_{17} P_{19} P_{20} P_5 P_8 Q_{11} Q_{15} Q_{18} Q_2 Q_3 Q_4 Q_6 Q_7 + \\ & \dots + P_1 P_{10} P_{14} P_{16} P_{17} P_{19} P_{20} P_6 P_7 Q_{11} Q_{15} Q_{18} Q_2 Q_3 Q_4 + \dots \end{aligned} \quad (2)$$

С учетом вышесказанного следует разработать модель оптимальной конфигурации СУД МКА ДЗЗ для надежной реализации режимов ориентации при обслуживании наблюдаемого объекта.

Исходные данные модели:

$\alpha_1^v(X), \alpha_2^v(X)$ — интенсивности функционирования режимов ориентации СУД $b_v (v \in N(X))$ МКА ДЗЗ, задействованных при реализации плана обслуживания объекта $X = \|x_{v\chi ij}\|$ на интервале работы, где $b_v \in B$ — МКА из состава группировки;

$\Phi^v = \{\Phi_l^v, l = \overline{1, L^v}\}$ — множество работоспособных ФЭ СУД b_v -го МКА;

$\mathfrak{R}^v(P_1^v, P_2^v, \dots, \alpha_1^v, \alpha_2^v)$ — вероятностный полином безотказной работы СУД b_v -го МКА по реализации режимов ориентации на заданном интервале работы;

$p_l^v, l = \overline{1, L^v}$ — вероятность безотказной работы ФЭ СУД b_v -го МКА;

$Y^v = \{y_1, y_2, \dots, y_{L^v}\}^T$ — допустимые варианты конфигураций СУД b_v -го МКА.

Тогда область допустимых конфигураций СУД b_v -го МКА ДЗЗ

$$\Delta^v = \left\{ (y_1, y_2, \dots, y_{L^v})^T \middle| y_l \in \{0, 1\}, l = \overline{1, L^v} \right\}. \quad (3)$$

Задача выбора конфигурации СУД b_v -го МКА представляется выражением

$$\max_{Y^v \in \Delta^v} P^v(Y^v), \quad (4)$$

где $P^v(Y^v) = \mathfrak{R}^v(p_1, y_1^v, p_2^v, y_2^v, \dots, p_{L^v}^v, y_{L^v}^v, \alpha_1^v, \alpha_2^v)$ — показатель надежности реализации режимов ориентации СУД МКА в условиях заданной циклограммы их применения.

Решение серии задач (4) дает возможность получить оптимальные конфигурации для всех МКА из состава МСГ при выполнении целевой задачи, что позволит рассчитать общий показатель надежности применения группировки МКА ДЗЗ в целом.

В настоящее время смена конфигурации бортовой аппаратуры МКА происходит по заранее сформированному графику либо ситуативно в случае возникновения неисправности. Смена допустимой конфигурации происходит в установленный конструктором МКА ДЗЗ период. Данный подход не позволяет равномерно расходовать такой системный технический ресурс, как наработка на отказ ФЭ. Вследствие неравномерности использования элементов бортовой аппаратуры снижается надежность МКА и в целом всей группировки [13–15].

Таким образом, возникает необходимость изменения конфигурации СУД под заданную интенсивность применения МКА для достижения равномерности задействования ФЭ в целях повышения показателей надежности функционирования МСГ в целом (5):

$$P_{\text{МСГ}}(X) = 1 - \prod_{v \in N(X)} (1 - P_v(X)), \quad (5)$$

где $P_{\text{МСГ}}(X)$ — показатель надежности применения МСГ при обслуживании наблюдаемого объекта.

Эксперимент. Рассмотрим вычислительный эксперимент по имитации функционирования МСГ МКА ДЗЗ с оперативной сменой конфигурации СУД. Так как МСГ МКА является необслуживаемой сложной технической системой, то показатель надежности применения определяется в соответствии с ГОСТ 27.002-2015 для невосстанавливаемых систем.

Для определения оптимальной конфигурации СУД МКА ДЗЗ при заданной интенсивности функционирования режимов ориентации и стабилизации воспользуемся исходными данными для СУД МКА „Аист-2Д“, представленными в работе [8] (табл. 2).

Таблица 2

Блоки функциональных элементов	Номер элемента в блоке				Наработка на отказ, ч
	1	2	3	4	
ОИУС	0,95	0,94	0,96	0,96	60000
УДМ	0,95	0,94	0,95	0,94	60000
ССН	0,94	—	—	—	60000
ОЗД	0,93	0,93	—	—	50000
ПОЗ	0,94	0,97	—	—	9000
МА	0,95	0,75	—	—	50000
ЭМ	0,95	0,94	0,96	—	50000

Типовой суточный план применения МКА ДЗЗ предусматривает съемку пяти-шести объектов наблюдения за один виток, при этом они должны находиться в освещенной части земной поверхности. Технологические ограничения по функционированию МКА позволяют организовать не более двух рабочих витков в сутки над районом расположения объекта наблюдения.

Для каждого периода планирования применения МКА рассчитывается показатель ВБР (P_i) по всем допустимым вариантам конфигурации СУД МКА ДЗЗ (табл. 3) и выбирается вариант с максимальным значением P_i . Вариант конфигурации под номером 332 имеет максимальное значение $P_i = 0,99053329$, поэтому он выбран для текущего этапа функционирования МКА ДЗЗ.

Схема вычислительного эксперимента представлена на рис. 2: *a* — обобщенный алгоритм вычислительного эксперимента, *б* — алгоритм процедуры выбора варианта конфигурации системы управления движением МКА для заданной интенсивности функционирования МСГ и расчета показателя ее надежности. Разработанный алгоритм позволяет рассчитать показатель надежности применения МСГ МКА ДЗЗ при заданной интенсивности использования каждого из МКА на интервале функционирования.

Результаты функционирования МСГ МКА ДЗЗ представлены в табл. 4 (период моделирования 1100 суток, количество МКА в МСГ равно 5; $P_{\text{пл}}$ — ВБР при плановой смене конфигурации).

Анализ результатов вычислительного эксперимента показал (рис. 3), что снижение показателя ВБР при плановой смене конфигурации происходит на 15 % быстрее, чем при оперативной, вследствие более неравномерного расходования системного технического ресурса МСГ МКА.

Таблица 3

Вариант конфигурации	P_i	ФЭ СУД
0	0,98848822	[1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1]
1	0,99000008	[1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1]
2	0,99049309	[1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1]
...
332	0,99053329	[1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1]
333	0,98889694	[1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1]

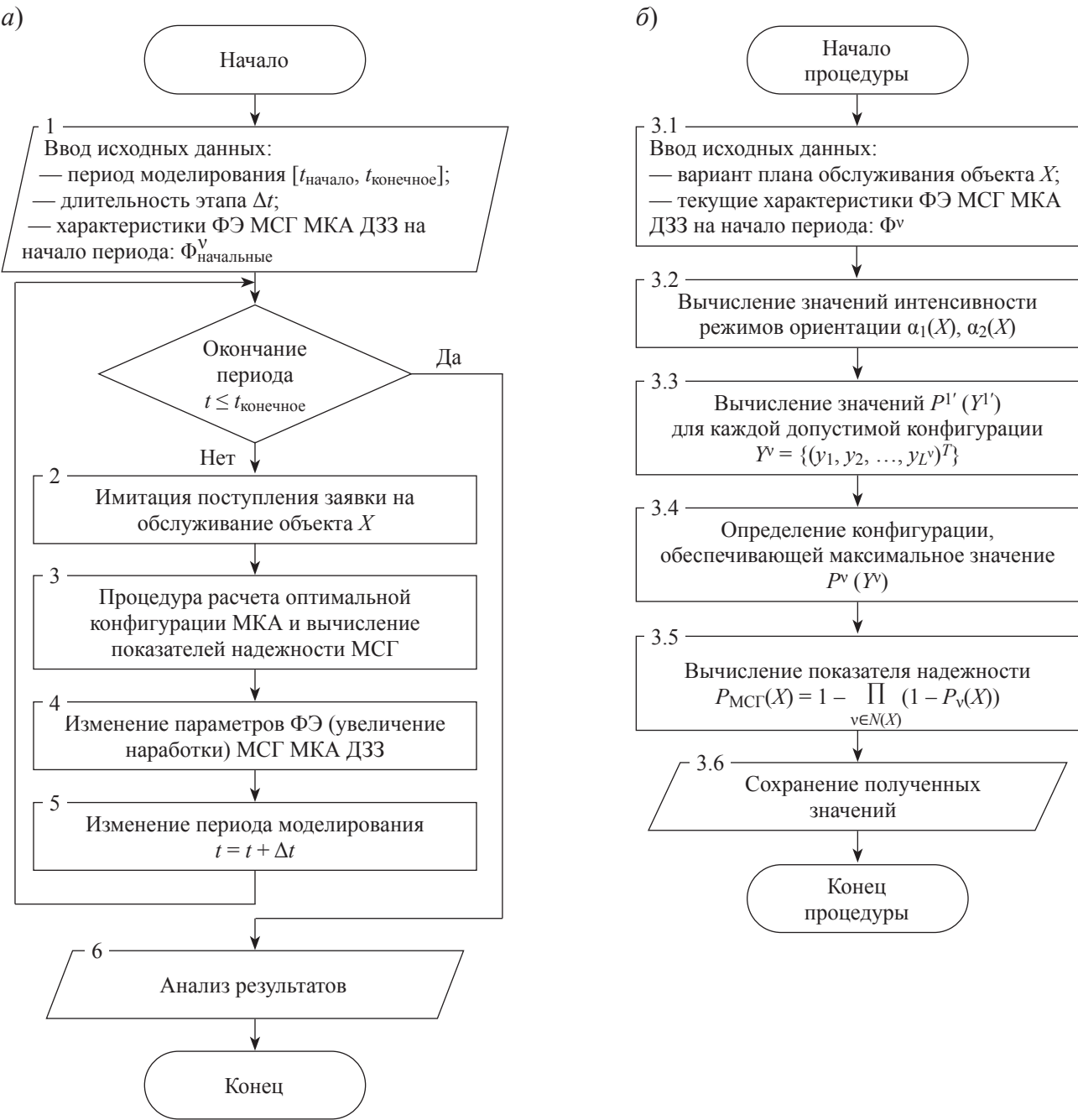


Рис.2

Таблица 4

День	P_i	№ п/п	Конфигурация	$P_{\text{пл}}$
1	0,804480784	37	1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1	0,816677252
2	0,848432573	105	1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1	0,858085937
3	0,847161951	293	1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 1	0,856796148
...
1098	0,783043	85	1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1	0,748342
1099	0,743055	168	1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1	0,702911
1100	0,727698	22	1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1	0,746181

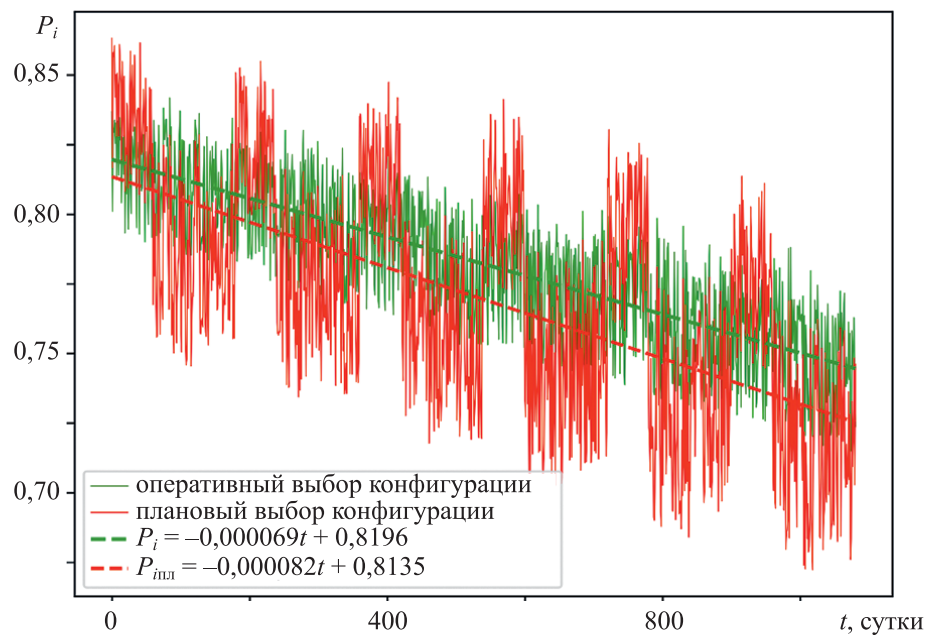


Рис. 3

Заключение. Предложен подход, позволяющий обеспечить предельно допустимую надежность функционирования МКА ДЗЗ при целевом применении и равномерно расходовать системный технический ресурс МСГ МКА.

Для оценивания показателя надежности вариантов управления МСГ МКА ДЗЗ при обслуживании объекта наблюдения предложена методика, основанная на построении схемы функциональной целостности СУД МКА, функциональные вершины которой отображают как работоспособность тех или иных ФЭ системы (*функциональную структуру СУД*), так и потребности в реализации тех или иных режимов ориентации (*технологическую структуру СУД*). Представленный подход позволяет оперативно определять наилучший вариант конфигурации СУД для выполнения текущего плана обслуживания объекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pavlov A. N., Ivanov D. V., Pavlov D. A. et al. Optimization of network redundancy and contingency planning in sustainable and resilient supply chain resource management under conditions of structural dynamics // Annals of Operations Research. 2019.
2. Сафронов С. Л., Ткаченко И. С., Иванушкин М. А., Волгин С. С. Современные подходы к созданию малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли на базе унифицированных платформ. Самара: Самар. гос. ун-т, 2019. 278 с.
3. Павлов А. Н., Павлов Д. А., Захаров В. В. Technology Resolution Criterion of Uncertainty in Intelligent Distributed Decision Support Systems // Studies in Computational Intelligence. 2020. Vol. 868. P. 365–373.

4. Калинин В. Н., Кулаков А. Ю., Павлов А. Н. и др. Методы и алгоритмы синтеза технологий и программ управления реконфигурацией бортовых систем маломассоразмерных космических аппаратов // Информатика и автоматизация. 2021. Т. 20, № 2. С. 236–269.
5. Pavlov A. N., Vorotygin V. N., Pavlov D. A. Methodology of Structural–Functional Synthesis for the Small Spacecraft Onboard System Appearance // Stability and Control Processes. Cham: Springer Intern. Publ., 2022. P. 687–694.
6. Викторев Е. А., Бурлаков С. А., Якушенко С. А. и др. Научно-технические проблемы создания и применения группировок военных малых космических аппаратов связи для информационного обеспечения боевых действий // Междунар. журн. гуманитарных и естественных наук. 2023. № 3-2 (78). С. 6–11.
7. Pavlov A. N., Pavlov D. A., Kulakov A. Yu. et al. Investigation of the structural and functional reliability of the motion control and navigation system of a small spacecraft in the conditions of its multi-mode operation // Engineering Journal: Science and Innovation. 2021. № 11 (119).
8. Кирилин А. Н., Ахметов Р. Н., Шахматов Е. В. и др. Опытнo-технологический малый космический аппарат „Аист-2Д“. Самара: СамНЦ РАН, 2023.
9. Гордеев А. В., Павлов А. Н., Умаров А. Б. и др. Задача планирования реконфигурации системы управления движением малого космического аппарата дистанционного зондирования Земли в условиях неизвестной циклограммы его функционирования // Тр. МАИ. 2022. № 126. С. 447–498.
10. Гордеев А. В., Воротягин В. Н., Павлов А. Н. Способ оперативного оценивания живучести многорежимных сложных объектов // Тр. МАИ. 2023. № 132.
11. Гордеев А. В., Павлов А. Н., Колесник Д. Ю. и др. Исследование потенциальных возможностей системы управления движением и навигации малого космического аппарата в условиях существенной неопределенности реализации режимов ориентации // Авиакосмическое приборостроение. 2023. № 8. С. 23–37.
12. Применение общего логико-вероятностного метода для анализа технических, военных организационно–функциональных систем и вооруженного противоборства: Монография / В. И. Поленин, И. А. Рябинин, С. К. Свиригин, И. А. Гладкова; под ред. А. С. Можяева. СПб: Рег. отд. РАЕН, 2011. 416 с.
13. Зеленцов В. А., Павлов А. Н. Распределение требований к надежности функциональных элементов бортового оборудования космического аппарата с учетом возможности их реализации // Авиакосмическое приборостроение. 2022. № 12. С. 3–13.
14. Спесивцев А. В., Павлов А. Н. Особенности выбора факторного пространства при оценивании и прогнозировании состояния сложного объекта // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 12. С. 920–924.
15. Алёшин Е. Н., Павлов А. Н., Павлов Д. А. и др. Модель планирования выполнения комплекса операций обработки информации в неоднородной распределенной системе с учетом многорежимности ее функционирования // Тр. ВКА им. А. Ф. Можайского. 2022. № 683. С. 13–20.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Александр Николаевич Павлов

— д-р техн. наук, профессор; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра автоматизированных систем управления космических комплексов; СПбФИЦ РАН, СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; вед. научный сотрудник; E-mail: pavlov62@list.ru

Денис Юрьевич Колесник

— канд. техн. наук; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра автоматизированных систем управления космических комплексов; преподаватель; E-mail: kolesnikden@rambler.ru

Андрей Владимирович Гордеев

— адъюнкт; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра автоматизированных систем управления космических комплексов; E-mail: grd611@bk.ru

Поступила в редакцию 23.07.24; одобрена после рецензирования 02.08.24; принята к публикации 23.09.24.

REFERENCES

1. Pavlov A., Ivanov D., Pavlov D., & Slinko A. *Annals of Operations Research*, 2019, DOI:10.1007/s10479-019-03182-6.
2. Safronov S.L., Tkachenko I.S., Ivanushkin M.A., Volgin S.S. *Sovremennyye podkhody k sozdaniyu malykh kosmicheskikh apparatov distantsionnogo zondirovaniya Zemli na baze unifitsirovannykh platform* (Modern Approaches to the Creation of Small Spacecraft for Remote Sensing of the Earth Based on Unified Platforms), Samara, 2019, 278 p. (in Russ.)
3. Pavlov A.N., Pavlov D.A., Zakharov V.V. *Studies in Computational Intelligence*, 2020, vol. 868, pp. 365–373.
4. Kalinin V.N., Kulakov A.Yu., Pavlov A.N. et al. *Informatics and Automation*, 2021, no. 2(20), pp. 236–269. (in Russ.)

5. Pavlov A.N., Vorotygin V.N., Pavlov D.A. *Stability and Control Processes*, Cham, Springer International Publishing, 2022, pp. 687–694.
6. Viktorov E.A., Burlakov S.A., Yakushenko S.A. et al. *Mezhdunarodny zhurnal gumanitarnykh i yestestvennykh nauk*, 2023, no. 3-2(78), pp. 6–11. (in Russ.)
7. Pavlov A.N., Pavlov D.A., Kulakov A.Yu. et al. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2021, no. 11(119). (in Russ.)
8. Kirilin A.N., Akhmetov R.N., Shakhmatov E.V., Tkachenko S.I., Baklanov A.I., Salmin V.V., Semkin N.D., Tkachenko I.S., Goryachkin O.V. *Opytno-tekhnologicheskii malyy kosmicheskii apparat "AIST-2D"* (Experimental and technological small spacecraft "AIST-2D"), Samara, 2017, 324 p. (in Russ.)
9. Pavlov A.N., Umarov A.B., Kulakov A.Yu., Gordeev A.V. *Trudy MAI*, 2022, no. 126, pp. 447–498. (in Russ.)
10. Pavlov A.N., Gordeev A.V., Vorotyagin V.N. *Trudy MAI*, 2023, no. 132. (in Russ.)
11. Pavlov A.N., Kolesnik D.Ju., Gordeev A.V., Vorotyagin V.N. *Aerospace Instrument-Making*, 2023, no. 8, pp. 23–37. (in Russ.)
12. Polenin V.I., Ryabinin I.A., Svirin S.K., Gladkova I.A. *Primeneniye obshchego logiko-veroyatnostnogo metoda dlya analiza tekhnicheskikh, voyennykh organizatsionno-funktsional'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), St. Petersburg, 2011, 416 p. (in Russ.)
13. Zelentsov V.A., Pavlov A.N. *Aerospace Instrument-Making*, 2022, no. 12, pp. 3–13. (in Russ.)
14. Spesivtsev A.V., Pavlov A.N. *Journal of Instrument Engineering*, 2022, no. 12(65), pp. 920–924, DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-12-920-924. (in Russ.)
15. Aleshin E.N., Pavlov A.N., Pavlov D.A. et al. *Proc. of the A.F. Mozhaisky Military Space Academy*, 2022, no. 683, pp. 13-20. (in Russ.)

DATA ON AUTHORS

Alexander N. Pavlov

— Dr. Sci., Professor; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Automated Control Systems for Space Complexes; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Information Technologies in Systems Analysis and Modeling, Leading Researcher; E-mail: pavlov62@list.ru

Denis Yu. Kolesnik

— PhD; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Automated Control Systems for Space Complexes, Lecturer; E-mail: kolesnikden@rambler.ru

Andrey V. Gordeev

— Post-Graduate Student; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Automated Control Systems for Space Complexes; E-mail: grd611@bk.ru

Received 23.07.24; approved after reviewing 02.08.24; accepted for publication 23.09.24.