

ПЛАНИРОВАНИЕ РЕКОНФИГУРАЦИИ МНОГОРЕЖИМНЫХ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

А. Н. ПАВЛОВ^{1,2}, А. Б. УМАРОВ^{1*}, Д. А. ПАВЛОВ¹, А. В. ГОРДЕЕВ¹

¹ Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия
*antropicier737@gmail.com

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

Аннотация. Представлен подход к планированию реконфигурации сложных многорежимных объектов в условиях заданной или неизвестной циклограммы режимов функционирования. Предложенный подход основан на концепции комплексного (системного) моделирования, концепции параметрического генома структуры с учетом функциональных и технологических особенностей исследуемого объекта. Наряду с классической „слепой“ технологией реконфигурации рассмотрена технология структурно-функциональной реконфигурации, реализующая смену структурных состояний исследуемых объектов как при возникновении нештатных ситуаций, так и в процессе планового функционирования в целях повышения надежности и увеличения сроков функционирования объектов за счет равномерной нагрузки элементов. Проведен сравнительный анализ результатов планирования реконфигурации сложных многорежимных объектов на основе указанных технологий, продемонстрировавший преимущество технологии структурно-функциональной реконфигурации.

Ключевые слова: многорежимный сложный объект, циклограмма режимов функционирования, „слепая“ и структурно-функциональная реконфигурация, параметрический геном, комплексное моделирование

Благодарности: работа выполнена за счет гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 20-08-01046 в рамках бюджетной темы FFZF-2022-0004.

Ссылка для цитирования: Павлов А. Н., Умаров А. Б., Павлов Д. А., Гордеев А. В. Планирование реконфигурации многорежимных сложных объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 11. С. 802—812. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-11-802-812.

PLANNING THE RECONFIGURATION OF MULTI-MODE COMPLEX OBJECTS

A. N. Pavlov^{1,2}, A. B. Umarov^{1*}, D. A. Pavlov¹, A. V. Gordeev¹

¹A. F. Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia
*antropicier737@gmail.com

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

Abstract. An approach to planning the reconfiguration of complex multi-mode objects under conditions of a given or unknown cyclogram of operating modes is considered. The proposed approach is based on the concept of complex (system) modeling, concept of parametric genome structure, taking into account the functional and technological features of the object under study. Along with the classical "blind" reconfiguration technology, the technology of structural and functional reconfiguration is considered, which implements the change of the structural states of the studied objects both in the event of emergency situations and in the process of planned functioning in order to improve the reliability and increase the duration of the functioning of objects due to the uniform load of elements. A comparative analysis of the results of planning the reconfiguration of complex multimode objects based on these technologies is carried out, advantages of the technology of structural and functional reconfiguration are demonstrated.

Keywords: multi-mode complex object, cyclogram of functioning modes, "blind" and structural-functional reconfiguration, parametric genome, complex modeling

Acknowledgments: the work was carried out at the expense of the Russian Foundation for Basic Research (grant N 20-08-01046), within the framework of the budget theme FFZF-2022-0004.

For citation: Pavlov A. N., Umarov A. B., Pavlov D. A., Gordeev A. V. Planning the reconfiguration of multi-mode complex objects. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 11. P. 802—812 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-11-802-812.

Введение. Сложность современных объектов приводит к необходимости учета различных факторов их взаимодействия с окружающей средой, что связано с увеличением числа входящих в их состав элементов и подсистем, а также, соответственно, со стремительным ростом числа внутренних связей и проявляется в таких аспектах, как структурная сложность, сложность функционирования, сложность выбора поведения, сложность моделирования и сложность развития [1—6]. Однако указанные аспекты сложности связаны не только с неопределенными воздействиями внешней среды, имеющими целенаправленный и/или нецеленаправленный характер, но и с множеством различных режимов функционирования системы, при которых взаимодействие структурных частей изменяется, что приводит к возникновению структурной динамики сложного объекта (СЛО).

При этом следует отметить, что системы с фиксированной структурой, настраиваемые обычно на установившийся (какой-то заданный) режим, не обеспечивают наилучшего качества управления в других режимах.

Для успешной реализации того или иного режима функционирования СЛО требуется, чтобы данные системы были управляемы, т.е. способны изменять (перестраивать) свою структуру (структуры), состояния, параметры, способы функционирования в различных условиях обстановки. Следует отметить, что для обеспечения надежности и живучести многорежимных СЛО [4—7] широкое распространение получил такой вариант управления их структурами, как *конфигурирование и реконфигурация*.

Далее под *управлением (планированием) конфигурацией СЛО* понимается плановое изменение рабочей структуры (конфигурации) объекта для эффективного достижения поставленных целей, определенных заранее (или ситуационно) на конкретном этапе реализации режимов функционирования. В свою очередь, под *управлением (планированием) реконфигурацией СЛО* понимается процесс ситуационного изменения рабочей конфигурации объекта в целях сохранения, восстановления (повышения) до требуемого уровня значений показателей надежности и живучести при реализации режимов функционирования СЛО либо обеспечения минимального снижения уровня значений указанных показателей при деградации функций и/или выходе из строя функциональных элементов (ФЭ) и подсистем СЛО [7,8].

В связи с этим многорежимность и неопределенность условий функционирования обуславливают необходимость решения проблемы анализа и синтеза конфигурации и реконфигурации облика многорежимных СЛО, основанных на интеллектуальных подходах. При этом на этапе планирования конфигурации и реконфигурации СЛО должны быть синтезированы такие взаимосвязанные множества функций (режимов функционирования) и структур, а также, возможно, внесен такой уровень избыточности в указанные множества, при которых на этапе применения СЛО по целевому назначению имелась бы возможность гибко реагировать на все расчетные и нерасчетные нештатные ситуации, вызывающие структурные изменения объекта.

С формальной точки зрения решение указанной проблемы возможно в рамках такого важнейшего класса современных научно-технических задач, как задачи многокритериального структурно-функционального синтеза СЛО на различных этапах их жизненного цикла [5, 6, 9]. К настоящему времени рассматриваемый класс задач структурно-функционального синтеза и управления развитием многорежимных СЛО исследован недостаточно глубоко. Поэтому задача разработки и исследования синтеза конфигурации и реконфигурации облика многорежимных СЛО различного назначения, анализ возможностей аппаратных и программных средств их реализации являются актуальными.

Вербальная постановка задачи планирования конфигурации и реконфигурации многорежимного сложного объекта. Прежде всего, отметим, что для каждой выполняемой функции или определенного набора функций (достижение целей) многорежимного СЛО может быть определена своя конкретная текущая (рабочая) конфигурация его ФЭ и режимов функционирования. Под рабочей конфигурацией понимается совокупность включенных

в состав объекта и используемых при его функционировании элементов. Тогда в зависимости от объема выполняемых функций и числа работающих ФЭ и подсистем многорежимного СЛО множество его структурных состояний может быть разделено на работоспособные, частично работоспособные и неработоспособные [5, 6].

При планировании конфигурации (реконфигурации) многорежимного СЛО требуется сформировать последовательности целевых и обеспечивающих операций, выполняемых в целях изменения рабочей конфигурации составляющих его ФЭ для эффективной реализации необходимых режимов функционирования. При этом задача планирования конфигурации и реконфигурации многорежимного СЛО усложняется неизвестной циклограммой задействования режимов его функционирования.

На основании вышеприведенного описания процессов функционирования многорежимного СЛО *суть задачи планирования конфигурации и реконфигурации СЛО* сводится к следующему:

— *известно*: номенклатура элементов, входящих в состав многорежимного объекта, режимы его функционирования, задачи, выполняемые СЛО, и имеющиеся ресурсные ограничения;

— *требуется найти*: последовательность рабочих конфигураций ФЭ для обеспечения функционирования СЛО с наилучшим качеством с учетом заданных критериев в условиях заданной или неизвестной циклограммы режимов функционирования.

В рамках классической технологии реконфигурации СЛО, которую зачастую называют „слепой“ *реконфигурацией* [5, 6, 8], при отказах и нарушениях корректности функционирования многорежимного СЛО в целях сохранения его наиболее приоритетных функций или допустимых условий работоспособности „жертвуют“ другими функциями или частью работоспособных элементов. Однако необходимо отметить, что в ходе „слепой“ реконфигурации не проводится оценивание и анализ целевых возможностей СЛО для обоснованного перераспределения функций между его работоспособными элементами.

Таким образом, применительно к многорежимным СЛО реконфигурацию необходимо рассматривать как в качестве способа парирования отказов ФЭ, так и в качестве технологии управления, направленной на повышение надежности и живучести функционирования объекта. Данную технологию, в отличие от „слепой“ реконфигурации, называют *структурно-функциональной реконфигурацией* [6, 8, 9].

Важной особенностью структурно-функциональной реконфигурации многорежимного СЛО для улучшения общего целевого эффекта на максимально возможном интервале времени его активного функционирования является направленность на равномерную загрузку ФЭ и подсистем при смене конфигураций СЛО, что гарантирует его высокую надежность, живучесть и устойчивость.

Поэтому при планировании структурно-функциональной реконфигурации многорежимного СЛО в условиях заданной или неизвестной циклограммы режимов функционирования требуется решить задачу выбора рабочей конфигурации ФЭ СЛО с учетом указанной особенности.

Теоретико-множественная постановка задачи планирования конфигурации и реконфигурации многорежимного сложного объекта. Для конструктивного решения задачи поиска допустимых вариантов конфигураций многорежимного СЛО, а также рациональных сценариев реконфигурации СЛО, с использованием методологии и технологий системного (комплексного) моделирования [6, 8—10], предлагается следующее описание структуры выбора в условиях неопределенности и многокритериальности:

$$\left(\{M(\omega, \nu)\}_{\nu \in V}, \Delta_g(\omega), \{F_h(\mathbf{u}), \mathbf{u} \in \Delta_g(\omega)\}_{h \in H}, \{\Phi^k\}_{k \in \Gamma}, (\Omega = \{\omega\}, \mathfrak{Z}, P) \right), \quad (1)$$

где $\{M(\omega, \nu)\}_{\nu \in V}$ — комплекс моделей конфигурирования и реконфигурации СЛО в условиях неопределенности:

$M(\omega, 1)$ — модель структурно-функционального (технологического) взаимодействия ФЭ СЛО в условиях заданной или неизвестной циклограммы режимов функционирования на основе логико-вероятностного подхода;

$M(\omega, 2)$ — модель оценивания структурно-функциональной (технологической) надежности СЛО в условиях заданной или неизвестной циклограммы задействования режимов функционирования на основе концепции параметрического генома структуры;

$M(\omega, 3)$ — модель оценивания живучести СЛО в условиях заданной или неизвестной циклограммы задействования режимов функционирования и деструктивных воздействий на основе концепции параметрического генома структуры;

$M(\omega, 4)$ — модель структурно-параметрического конфигурирования СЛО в условиях заданной или неизвестной циклограммы его функционирования с учетом равномерной загрузки ФЭ и ограниченных ресурсов;

$M(\omega, 5)$ — модель планирования реконфигурации СЛО в условиях заданной или неизвестной циклограммы его функционирования с учетом ограниченных ресурсов.

В выражении (1) приняты также следующие обозначения: $\Delta_g(\omega)$ — множество допустимых вариантов проведения конфигурирования и реконфигурации СЛО, удовлетворяющих ограничениям на имеющиеся ресурсы, с учетом равномерной загрузки ФЭ; $\{F_h(\mathbf{u}), \mathbf{u} \in \Delta_g(\omega)\}_{h \in H}$ — частные показатели качества функционирования многорежимного СЛО; $\{\Phi^k\}_{k \in \Gamma}$ — множество согласующих правил, позволяющих задавать результирующие отношения предпочтения задачи конфигурирования и реконфигурации СЛО; $(\Omega = \{\omega\}, \mathfrak{Z}, P)$ — пространство неопределенности.

Для формализации задачи поиска конфигураций и последовательностей (сценариев) реконфигураций СЛО в процессе его функционирования с учетом многорежимности введем в рассмотрение системный динамический альтернативный мультиграф (ДАМГ) следующего вида:

$$G_\chi^t = \langle X_\chi^t, \Gamma_\chi^t \rangle, \quad (2)$$

где $\chi \in \{1, 2, 3\}$ — индекс, характеризующий тип структуры управления СЛО;

$G_1^t = \langle X_1^t, \Gamma_1^t \rangle$ — граф, описывающий технологическую структуру управления СЛО и учитывающий альтернативные варианты его функционирования, здесь X_1^t — множество вершин, отображающих режимы функционирования СЛО, Γ_1^t — множество дуг, определяющих последовательность выполнения и взаимосвязь режимов функционирования СЛО для реализации его собственных функций;

$G_2^t = \langle X_2^t, \Gamma_2^t \rangle$ — граф, описывающий техническую структуру подсистем и СЛО в целом и учитывающий альтернативные варианты рабочей конфигурации ФЭ для заданных режимов функционирования СЛО, здесь X_2^t — множество вершин, соответствующих ФЭ СЛО, Γ_2^t — множество дуг, отображающих варианты взаимодействия ФЭ для реализации заданных режимов функционирования СЛО;

$G_3^t = \langle X_3^t, \Gamma_3^t \rangle$ — граф, описывающий функциональную структуру режимов функционирования СЛО и учитывающий альтернативные варианты реализации функций ФЭ при работе в заданном режиме функционирования, здесь X_3^t — множество вершин, отображающих функции ФЭ, Γ_3^t — множество дуг, отображающих взаимосвязь и последовательность выполнения функций ФЭ для реализации заданных режимов функционирования СЛО;

$t \in \mathbb{T}$ — множество моментов времени, на котором можно выделить интервал проведения реконфигурации $T = (t_0, t_f]$.

Задано множество допустимых (исходя из содержательной постановки задачи управления структурной динамикой СЛО) отображений указанных выше ДАМГ друг на друга:

$$L_{\langle \chi, \chi' \rangle}^t : G_\chi^t \rightarrow G_{\chi'}^t. \quad (3)$$

С учетом вышеизложенного структурное состояние СЛО в момент времени t можно определить как подмножество декартова произведения множеств элементов, на которых строятся технологическая, техническая и функциональная структуры: $S_\delta \subseteq X_1^t \times X_2^t \times X_3^t$, $\delta = 1, \dots, K_\Delta$, где K_Δ — количество интервалов постоянства структуры.

Модели $M(\omega, 1)$, $M(\omega, 2)$, $M(\omega, 3)$, $M(\omega, 4)$ необходимы для описания многоструктурного макросостояния СЛО, включающего техническую, функциональную и технологическую структуры, для вычисления значений интегральных показателей структурно-функциональной надежности и живучести СЛО, а также поиска допустимых вариантов конфигураций в условиях заданной или неизвестной циклограммы режимов функционирования и деструктивных воздействий с учетом равномерной загрузки ФЭ и ограниченных ресурсов.

В основе описанных выше моделей лежит предложенная авторами концепция параметрического генома структуры многорежимных СЛО [10].

Параметрическим геномом структуры является параметрический вектор коэффициентов однородного полинома структурной надежности [11], который содержит в концентрированном виде структурно-топологические свойства исследуемого многорежимного СЛО и позволяет вычислить потенциальные значения показателей надежности и живучести функционирования объекта в условиях как известной, так и неизвестной технологии задействования режимов.

Формальное описание и результаты применения моделей $M(\omega, 1)$, $M(\omega, 2)$, $M(\omega, 3)$, $M(\omega, 4)$ приведены в работах [10, 12—16].

Рассмотрим модель $M(\omega, 5)$ планирования реконфигурации СЛО в условиях заданной или неизвестной циклограммы режимов функционирования с учетом ограниченных ресурсов.

Введем множество допустимых отображений многоструктурных состояний СЛО друг на друга:

$$\Pi_{\langle \delta, \delta' \rangle}^t : S_\delta \rightarrow S_{\delta'}. \quad (4)$$

При этом предполагается, что каждое состояние СЛО в момент времени t задается в результате операции композиции соответствующих ДАМГ, описывающих каждый тип структуры.

Введем следующее допущение. Структурное макросостояние СЛО характеризуется временными интервалами постоянства, при этом его изменение может происходить автоматически при парировании нештатной ситуации; принудительно, по инициативе оператора, осуществляющего управление объектом.

Каждому подынтервалу $(t_\delta, t_{\delta+1}]$ соответствует структурное состояние СЛО $S_\delta \in S = \{S_1, \dots, S_{K_\Delta}\}$. Возникновение ситуаций, связанных с динамикой структур СЛО, вызвано появлением нештатной ситуации из-за сбоев (или отказов) ФЭ, а также выполнением поставленной задачи. Такие ситуации сопровождаются переходом из текущего структурного состояния S_δ в новое структурное состояние $S_{\delta+1}$.

Тогда структурную динамику СЛО с учетом проведения конфигурирования и реконфигурации объекта можно интерпретировать как последовательность (композицию) отображе-

ний вида (4) во времени: $Y^{t_f} = \Pi_{\langle \delta, \delta_1 \rangle}^{t_1} \circ \Pi_{\langle \delta_1, \delta_2 \rangle}^{t_2} \circ \dots \circ \Pi_{\langle \delta^n, \delta^f \rangle}^{t_f}$, при которой обеспечиваются требуемые значения показателей надежности и живучести функционирования СЛО.

Таким образом, формально процесс планирования структурно-функциональной реконфигурации многорежимного СЛО может быть представлен как поиск наиболее предпочтительной последовательности $Y_*^{t_f}$ проведения конфигурирования и реконфигурации СЛО:

$$\Phi_p \left(X_{\chi}^t, \Gamma_{\chi}^t, L_{\langle \chi, \chi' \rangle}^t, \Pi_{\langle \delta, \delta' \rangle}^t, t \in (t_0, t_f] \right) \rightarrow \underset{Y^{t_f} \in \Delta_g}{\text{extr}} ;$$

$$\Delta_g = \left\{ Y^{t_f} \mid Y^{t_f} = \Pi_{\langle \delta, \delta_1 \rangle}^{t_1} \circ \Pi_{\langle \delta_1, \delta_2 \rangle}^{t_2} \circ \dots \circ \Pi_{\langle \delta^n, \delta^f \rangle}^{t_f}; W_k \left(X_{\chi}^t, \Gamma_{\chi}^t, L_{\langle \chi, \chi' \rangle}^t, \Pi_{\langle \delta, \delta' \rangle}^t \right) \leq W_k^3; k = \overline{1, \Psi} \right\}, \quad (5)$$

где Φ_p — показатель или набор показателей, характеризующих надежность и живучесть функционирования СЛО, W_k^3 — заданные значения имеющегося ресурса.

Результаты планирования конфигурации и реконфигурации многорежимного сложного объекта. В качестве многорежимного СЛО рассмотрим систему управления движением и навигации (СУДН) малого космического аппарата (МКА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [17—19]. Режимы функционирования данной системы могут быть следующие режимы ориентации МКА: R_1 — целевой режим ориентации МКА, R_2 — режим солнечной ориентации, R_3 — режим сброса кинетического момента, R_4 — режим выдачи корректирующего импульса.

Схема функциональной целостности чувствительных элементов и режимов ориентации представлена на рис. 1 [11], где основные функциональные вершины схемы отображают следующие состояния: 1—4 — работоспособность одноосных измерителей угловой скорости: ОИУС₁—ОИУС₄; 5, 6 — работоспособность оптических солнечных датчиков: ОСД₁, ОСД₂; 7, 8 — работоспособность приборов ориентации на Землю: ПОЗ₁, ПОЗ₂; 9, 10 — работоспособность звездных датчиков: ЗД₁, ЗД₂; 11—14 — потребность в режимах R_1 — R_4 соответственно; вершины 15—33 являются фиктивными и отображают реальные логические взаимосвязи элементов СУДН МКА.

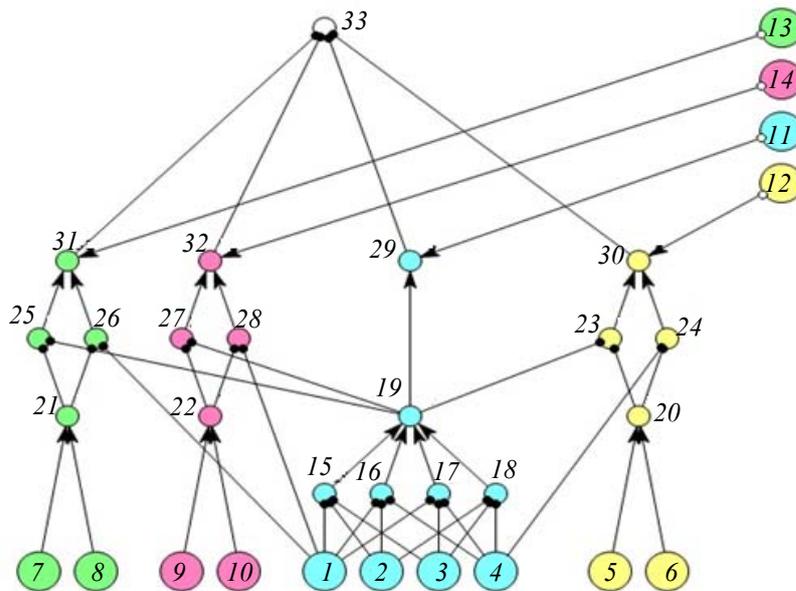


Рис. 1

Исходные данные для планирования:

— вероятность безотказной работы (ВБР) для каждого ФЭ СУДН МКА на начальный момент времени представлена в табл. 1;

— изменения значений ВБР элементов СУДН МКА после первого и последующих интервалов времени, характеризующихся постоянством структуры, представлены в табл. 2, при этом предполагается, что снижение ВБР по каждому из элементов одинаковое;

— для имитации сбоев ФЭ (бортовой аппаратуры), возникающих в системе, в зависимости от наработки на отказ предлагается воспользоваться следующим выражением:

$$\xi_i(t) = \begin{cases} 0, & p_i(t) \leq p_i^3, \\ 1, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad p_i^3 = 0,15, \quad i = 1, \dots, 10;$$

— энергопотребление ФЭ СУДН МКА на каждом интервале, см. табл. 1;

— энергоресурс на каждом интервале равен 115 Вт.

Таблица 1

ФЭ _{1–10}	ВБР	Энергопотребление, Вт
ОИУС ₁	0,955	11,0
ОИУС ₂	0,955	11,0
ОИУС ₃	0,973	15,0
ОИУС ₄	0,973	15,0
ОСД ₁	0,973	15,0
ОСД ₂	0,973	15,0
ПОЗ ₁	0,957	4,5
ПОЗ ₂	0,957	4,5
ЗД ₁	0,95	16,5
ЗД ₂	0,993	52,0

Таблица 2

Интервал	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ВБР	0,18	0,33	0,55	0,70	0,82	0,86	0,91	0,94	0,96	0,98

Результаты вычислительных экспериментов, проведенных с использованием технологии „слепой“ и структурно-функциональной реконфигурации в условиях неизвестной циклограммы задействования режимов ориентации, отражены в табл. 3, 4. Представлены задействованные ФЭ СУДН МКА ДЗЗ при использовании указанных технологий, а на рис. 2 приведены значения интегральных оценок надежности функционирования СУДН МКА в условиях неизвестной циклограммы задействования режимов ориентации.

Таблица 3

ФЭ _{1–10}	Интервал											Остаточная ВБР	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
ОИУС ₁													0,135
ОИУС ₂													0,135
ОИУС ₃													0,113
ОИУС ₄													0,113
ОСД ₁													0,113
ОСД ₂													0,113
ПОЗ ₁													0,137
ПОЗ ₂													0,957
ЗД ₁													0,130
ЗД ₂													0,993
Интегральная надежность	0,8389	0,3478	0,1781	0,0667	0,0166	0,0990	0,0657	0,0432	0,0187	0,0078	0,0024		

Таблица 4

ФЭ _{1–10}	Интервал								Остаточная ВБР
	1	2	3	4	5	6	7	8	
ОИУС ₁									0,135
ОИУС ₂									0,135
ОИУС ₃									0,113
ОИУС ₄									0,113
ОСД ₁									0,423
ОСД ₂									0,113
ПОЗ ₁									0,137
ПОЗ ₂									0,627
ЗД ₁									0,130
ЗД ₂									0,663
Интегральная надежность	0,8389	0,4958	0,4552	0,2829	0,2066	0,1229	0,0231	0,0112	

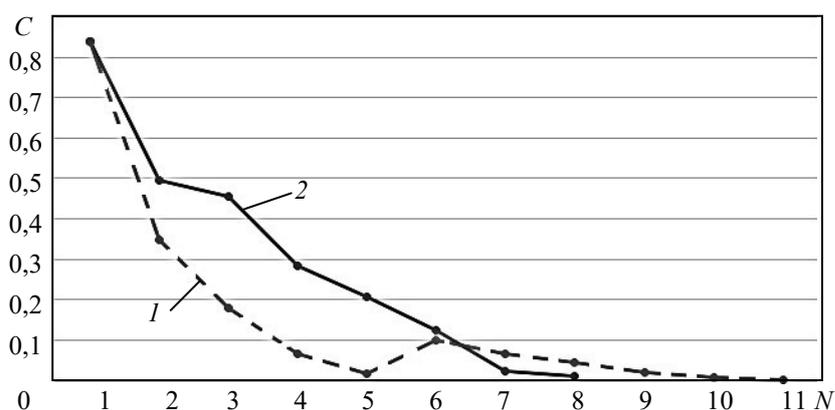


Рис. 2

Проанализируем результаты реконфигурации СУДН МКА ДЗЗ. Как видно из графика на рис. 2, интегральный показатель надежности функционирования системы (C) в случае использования технологии „слепой“ реконфигурации (кривая 1) принимает меньшие значения, чем при структурно-функциональной реконфигурации (кривая 2), на каждом из рассматриваемых интервалов (N) функционирования системы до 6-го интервала включительно.

Важно отметить, что применение „слепой“ реконфигурации обеспечивает, как видно, более продолжительный срок частичной работоспособности системы (возможно выполнение режима R₂) — до 11-го интервала. Тем не менее „выигрышным“ данный вариант реконфигурации назвать нельзя, так как начиная с 6-го интервала не будет реализован основной режим целевой ориентации.

Оценка средней интегральной надежности выполнения всех режимов ориентации СУДН на 6 интервалах времени дает следующие результаты: 0,4004 — в случае применения структурно-функциональной реконфигурации и 0,2414 — при „слепой“ реконфигурации. Тогда относительный выигрыш при использовании технологии структурно-функциональной реконфигурации достигает 60 %.

Заключение. В процессе функционирования сложных многорежимных объектов для сохранения требуемого (а иногда и повышения текущего) уровня значений показателей надежности и живучести необходимо осуществлять конфигурирование и реконфигурацию объекта с учетом многорежимности, неопределенных деструктивных воздействий, равномерности задействования ФЭ и ограниченных ресурсов.

В работе предложен подход к планированию реконфигурации многорежимных СЛО, основанный на анализе структурно-функциональных свойств объекта в условиях заданной или неизвестной циклограммы режимов его функционирования, а также показаны преимущества этой технологии перед классической „слепой“ реконфигурацией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nayak A., Reyes Levalle R., Lee S., Nof S. Y.* Resource sharing in cyber-physical systems: modelling framework and case studies // Intern. Journal of Production Research. 2016. Vol. 54, N 23. P. 6969—6983.
2. *Theorin A.* An event-driven manufacturing information system architecture for Industry 4.0 // Intern. Journal of Production Research. 2016. P. 1297—1311.
3. *Mehdi Jafari.* Optimal redundant sensor configuration for accuracy increasing in space inertial navigation system // Aerospace Science and Technology. 2015. Vol. 47. P. 467—472.
4. *Черкесов Г. Н., Недосекин А. О., Виноградов В. В.* Анализ функциональной живучести структурно-сложных технических систем // Надежность. 2018. № 2(18). С. 17—24.
5. *Охмилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М., Стыскин М. М., Джао В. Ю-Д.* Концепция и технологии проактивного управления жизненным циклом изделий // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 2. С. 187—190.
6. *Охмилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М.* Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
7. *Battaia O., Dolgui A., Guschinsky N.* Decision support for design of reconfigurable rotary machining systems for family part production // Intern. Journal of Production Research. 2017. Vol. 55, N 5. P. 1368—1385.
8. *Павлов А. Н.* Комплексное моделирование структурно-функциональной реконфигурации сложных объектов // Тр. СПИИРАН. 2013. № 5(28). С.143—168.
9. *Pavlov A. N., Vorotyagin V. N., Pavlov D. A., Zakharov V. V.* Methodology of Structural-Functional Synthesis for the Small Spacecraft Onboard System Appearance // Stability and Control Processes, SCP 2020; Lecture Notes in Control and Information Sciences – Proc. of the 4th Intern. Conf. Dedicated to the Memory of Professor Vladimir Zubov. Cham: Springer, 2022. P. 687—694.
10. *Павлов А. Н., Павлов Д. А., Алешин Е. Н., Воротягин В. Н., Умаров А. Б.* Моделирование и анализ структурно-функциональной надежности сложных многорежимных объектов // Тр. ВКА им. А. Ф. Можайского. 2021. № 677. С. 186—194.
11. *Поленин В. И., Рябинин И. А., Свиринов С. К., Гладкова И. А.* Применение общего логико-вероятностного метода для анализа технических, военных организационно-функциональных систем и вооруженного противоборства: Монография / Под ред. А. С. Можяева. СПб: Рег. отд. РАЕН, 2011. 416 с.
12. *Павлов А. Н., Воротягин В. Н., Кулаков А. Ю., Умаров А. Б.* Исследование структурно-функциональной надежности малых космических аппаратов при решении задач ориентации // Информатизация и связь. 2020. № 4. С. 156—164.
13. *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 // Тр. МАИ. 2021. № 120. С. 1—29.
14. *Structural and functional analysis of supply chain reliability in the presence of demand fluctuations / A. N. Pavlov, D. A. Pavlov, V. N. Vorotyagin, A. B. Umarov // Proc. Models and Methods for Researching Information Systems in Transport 2020 (MMRIST 2020), St. Petersburg, Russian Federation, Dec. 11—12, 2020. CEUR-WS 2021. Vol. 2803. P. 61—66.*
15. *Pavlov A. N., Umarov A. B., Aleshin Ye. N.* Study of the structural significance of supply chain elements with variable order rate // Intelligent Transport Systems. Transport Security – 2021. CEUR-WS 2021. Vol. 2924. P. 1—8.
16. *Павлов А. Н., Павлов Д. А., Умаров А. Б., Гордеев А. В.* Метод структурно-параметрического синтеза конфигураций многорежимного объекта // Информатика и автоматизация. 2022. № 4(21). С. 812—845.
17. *Methodology for supporting and making decisions on equipping the onboard equipment of a small spacecraft's motion control system / A. N. Pavlov, D. A. Pavlov, V. N. Vorotyagin, A. Yu. Kulakov // Intern. Journal Risk Assessment and Management. 2021. Vol. 24, N 2/2/4. P. 126—139.*
18. *Кирилин А. Н., Ахметов Р. Н., Шахматов Е. В., Ткаченко С. И., Бакланов А. И., Салмин В. В., Семкин Н. Д., Ткаченко И. С., Горячкин О. В.* Опыт-технологический малый космический аппарат „АИСТ-2Д“. Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2017. 324 с.

19. Шипов М. Г. Гашение угловых скоростей КА „Аист-2Д“ с использованием системы сброса кинетического момента // Вестн. Самар. ун-та. Авиационная и ракетно-космическая техника. 2019. № 2(18). С. 121—127.

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; ведущий научный сотрудник; E-mail: pavlov62@list.ru
- Александр Бахтиёрович Умаров** — адъюнкт; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра автоматизированных систем управления космических комплексов; E-mail: antropicier737@gmail.com
- Дмитрий Александрович Павлов** — канд. техн. наук; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра технологий и средств комплексной обработки и передачи информации в АСУ; преподаватель; E-mail: dpavlov239@mail.ru
- Андрей Владимирович Гордеев** — адъюнкт; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра автоматизированных систем управления космических комплексов; E-mail: grd611@bk.ru

Поступила в редакцию 18.07.2022; одобрена после рецензирования 23.07.2022; принята к публикации 30.09.2022.

REFERENCES

- Nayak A., Reyes Levalle R., Lee S., Nof S.Y. *International Journal of Production Research*, 2016, no. 23(54), pp. 6969–6983.
- Theorin A. *International Journal of Production Research*, 2016, pp. 1297–1311.
- Mehdi J. *Aerospace Science and Technology*, 2015, vol. 47, pp. 467–472.
- Cherkesov G.N., Nedosekin A.O., Vinogradov V.V. *Reliability-2018*, 2018, no. 2(18), pp. 17–24. (in Russ.)
- Okhtilev M. Yu., Sokolov B. V., Yusupov R. M., Styskin M. M., Gao Un.-D. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, no. 2(63), pp. 187–190. (in Russ.)
- Okhtilev M.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M. *Intellektual'nyye tekhnologii monitoringa sostoyaniya i upravleniya strukturnoy dinamiko slozhnykh tekhnicheskikh ob'yektov* (Intelligent Technologies for Monitoring the State and Managing the Structural Dynamics of Complex Technical Objects), Moscow, 2006, 410 p. (in Russ.)
- Battaia O., Dolgui A., Guschinsky N. *International Journal of Production Research*, 2017, no. 5(55), pp. 1368–1385.
- Pavlov A.N. *Trudy SPIIRAN* (SPIIRAS Proceedings), 2013, no. 5(28), pp. 143–168. (in Russ.)
- Pavlov A.N., Vorotyagin V.N., Pavlov D.A., Zakharov V.V. *Stability and Control Processes. SCP 2020. Lecture Notes in Control and Information Sciences*, Proc. of the 4th Intern. Conf. Dedicated to the Memory of Professor Vladimir Zubov, Springer, Cham, 2022, pp. 687–694.
- Pavlov A.N., Pavlov D.A., Aleshin E.N., Vorotyagin V.N., Umarov A.B. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*, 2021, no. 677, pp. 186–194 (in Russ.)
- 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.)
- Pavlov A.N., Kylakov A.Yu., Vorotyagin V.N., Umarov A.B. *Informatization and communication*, 2020, no. 5, pp. 132–140. (in Russ.)
- Pavlov A., Pavlov D., Umarov A. *Trudy MAI*, 2021, no. 120, pp. 1–29. (in Russ.)
- Pavlov A.N., Pavlov D.A., Vorotyagin V.N., Umarov A.B. *Proceedings of Models and Methods for Researching Information Systems in Transport 2020 (MMRIST 2020)*, St. Petersburg, Dec. 11–12, 2020, CEUR-WS 2021, vol. 2803, pp. 61–66.
- Pavlov A.N., Umarov A.B., Aleshin Ye.N. *Intelligent Transport Systems. Transport Security – 2021*, CEUR-WS 2021, vol. 2924, pp. 1–8.
- Pavlov A., Pavlov D., Umarov A., Gordeev A. *Informatics and Automation*, 2022, no. 4(21), pp. 812–845. (in Russ.)
- Pavlov A.N., Pavlov D.A., Vorotyagin V.N., Kulakov A.Yu. *International Journal Risk Assessment and Management*, 2021, vol. 24, pp. 126–139.
- 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-tekhnologicheskiiy malyy kosmicheskiiy apparat "AIST-2D"* (Experimental and technological small spacecraft "AIST-2D"), Samara, 2017, 324 p. (in Russ.)
- Shipov M.G. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, 2019, no. 2(18), pp. 121–127. (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 System Analysis and Modeling; Leading Researcher; E-mail: pavlov62@list.ru

-
- Alexander B. Umarov** — Post-Graduate Student; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Automated Control Systems for Space Complexes; E-mail: antropicier737@gmail.com
- Dmitry A. Pavlov** — PhD; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Technologies and Tools for Complex Processing and Transmission of Information in Automated Control System; Lecturer; E-mail: dpavlov239@mail.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 18.07.2022; approved after reviewing 23.07.2022; accepted for publication 30.09.2022.