

МЕТОДЫ, АЛГОРИТМЫ И ТЕХНОЛОГИИ РЕКОНФИГУРАЦИИ БОРТОВЫХ СИСТЕМ МАЛОМАССОРАЗМЕРНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А. Ю. КУЛАКОВ, А. Н. ПАВЛОВ, С. А. ПОТРЯСАЕВ, Б. В. СОКОЛОВ

*Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук,
199178, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: sokol@iias.spb.su*

Рассмотрены методологические, методические и технологические основы постановки и решения задач реконфигурации бортовых систем (БС) маломассо-размерных космических аппаратов (МКА). Предложено данные задачи исследовать и решать с использованием разработанной прикладной теории проактивного управления структурной динамикой сложных технических объектов. Представлены формальное описание и интерпретация решаемых задач реконфигурации БС МКА как задач динамического структурно-функционального синтеза сложных технических объектов. Разработаны соответствующие модели, методы и алгоритмы, базирующиеся на конструктивной реализации концепций комплексного моделирования и проактивного управления. Приводятся сведения об особенностях практической реализации разработанного специального модельно-алгоритмического обеспечения в экспериментальном образце программного комплекса.

Ключевые слова: реконфигурация, комплексное моделирование, проактивное управление, бортовые системы, маломассообразные космические аппараты

Введение. В современных условиях для обеспечения требуемой степени автономности, качества и оперативности управления состоянием такого сложного объекта, как маломассо-размерный космический аппарат (МКА), и его бортовых систем (БС) необходимо решить следующие основные научно-технические задачи. Во-первых, обеспечить модельно-алгоритмическое описание процессов смысловой интерпретации всех возможных штатных и нештатных состояний их функционирования и, во-вторых, на этой основе решить основные задачи комплексной автоматизации и интеллектуализации процессов мониторинга технического состояния и управления БС МКА в различной обстановке. Однако на практике в подавляющем большинстве случаев процессы мониторинга, прогнозирования и управления состоянием элементов, подсистем и всех БС с точки зрения обеспечения требуемых уровней показателей надежности, живучести и эффективности функционирования МКА автоматизированы, в лучшем случае, лишь частично. Как правило, в современных системах мониторинга технического состояния и управления БС МКА операторам предоставляется информация только о состоянии их элементов, а не объектов контроля в целом. Это приводит к тому, что интегральную оценку и прогнозирование состояния БС МКА, так же как и формирование необходимых управляющих воздействий, операторы выполняют в основном вручную, базирясь на эвристических правилах [1, 2].

Особую актуальность вопросы автономности и живучести приобретают при разработке и эксплуатации МКА наблюдения — дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [1, 2]. Важнейшими характеристиками качества функционирования таких МКА являются показатель оперативности выполнения программ работы специальной и обеспечивающей БС МКА, передачи и получения целевой информации и телеметрии наземным комплексом управления (НКУ), а также показатель, характеризующий возможности оперативного вмешательства в реализацию указанных программ в случае возникновения нештатной ситуации. Таким обра-

зом, эффективность функционирования как БС МКА, так и НКУ, и в целом АСУ МКА зависит от таких свойств, как автономность и живучесть.

Задача повышения уровня автономности, живучести, эффективности функционирования сложных технических объектов (СТО), к которым, в частности, относятся перечисленные классы космических средств (КСр), в научной литературе рассматривается в совокупности с задачами контроля, оценивания и технического диагностирования состояния СТО, проведения реконфигурации (структурной, функциональной, структурно-функциональной) структуры СТО, управления ее резервами, альтернативного и многорежимного управления, анализа отказоустойчивости и катастрофоустойчивости СТО [2, 3]. Однако все перечисленные исследования носят разрозненный и разобщенный характер. В связи с этим в проекте [4] получила дальнейшее развитие предложенная ранее прикладная теория проактивного управления структурной динамикой СТО, в рамках которой удалось с единой системно-кибернетической позиции подойти к вопросам обеспечения надежности, живучести, катастрофоустойчивости и отказоустойчивости СТО (в том числе и КСр) на основе конфигурации и реконфигурации их структур [2—4].

Под реконфигурацией структуры СТО (в том числе БС МКА, НКУ МКА) понимается целенаправленный процесс ее изменения в целях сохранения, восстановления, а в некоторых ситуациях и повышения показателей надежности, живучести, эффективности применения рассматриваемых КСр, либо обеспечения минимального снижения их требуемых значений при возможной деградации и/или выходе из строя элементов и подсистем СТО. В ходе выполнения проекта [4] было разработано два больших класса сценариев реконфигурации основных элементов и подсистем АСУ МКА: внутренняя реконфигурация, когда задействуются только собственные аппаратно-программные средства (АПС) БС МКА, и внешняя реконфигурация, когда в условиях деградации БС часть функций управления МКА перераспределяется между бортовым и наземным комплексами управления МКА. Рассмотрим формальную сторону решаемых в этом случае задач.

Решаемые задачи реконфигурации. Для формализации поставленной задачи введем в рассмотрение следующие базисные множества: $B = \{B_j, j = 1, \dots, J\}$ — множество элементов (подсистем) НКУ МКА, к которым относятся отдельные командно-измерительные комплексы (ОКИК), системы обмена данными (СОД), центры управления полетом (ЦУП), основной и резервные; $C_j = \{C_{j\lambda}, \lambda = 1, \dots, \Lambda_j\}$ — множество каналов информационного взаимодействия j -го элемента НКУ; $D = \{D_{\vartheta}, \vartheta = 1, \dots, I\}$ — множество операций взаимодействия, входящих в типовой технологический цикл управления (ТЦУ) МКА; $\Phi = \{\Phi_{\pi}, \pi = 1, \dots, P\}$ — множество функций, реализуемых МКА для выполнения основной целевой задачи; $R = \{R_{\varepsilon}, \varepsilon = 1, \dots, E\}$ — множество режимов функционирования БС МКА (например, режимов ориентации МКА); $\Theta = \{\Theta_s, s = 1, \dots, Z\}$ — множество алгоритмов управления БС МКА; $De = \{De_i, i = 1, \dots, N\}$ — множество элементов бортовых систем МКА; $W = \{W_k, k = 1, \dots, \Psi\}$ — множество ресурсов МКА, обеспечивающих работу его БС и функционирование МКА в целом.

Для описания процессов функционирования аппаратно-программных средств МКА и элементов (подсистем) НКУ, которые (для удобства) будем называть космическими средствами, входящими в состав АСУ МКА, введем в рассмотрение системный динамический альтернативный мультиграф (ДАМГ) следующего вида:

$$G_{\chi}^t = \langle X_{\chi}^t, \Gamma_{\chi}^t \rangle, \quad (1)$$

где индекс $\chi \in \{1, 2, 3\}$ характеризует тип структур КСр; $G_1^t = \langle X_1^t, \Gamma_1^t \rangle$ описывает функциональную структуру КСр и учитывает альтернативные варианты реализации режимов

функционирования КСр, X_1^t — множество вершин, соответствующих алгоритмам управления КСр, Γ_1^t — множество дуг, определяющих последовательность выполнения и взаимосвязь алгоритмов управления КСр при реализации программы полета; $G_2^t = \langle X_2^t, \Gamma_2^t \rangle$ описывает техническую структуру АПС КСр и учитывает альтернативные варианты рабочей конфигурации как БС МКА, так и НКУ МКА, X_2^t — множество вершин, соответствующих элементам технических структур АПС КСр, множество дуг Γ_2^t отражает варианты взаимодействия АПС КСр; $G_3^t = \langle X_3^t, \Gamma_3^t \rangle$ описывает технологическую структуру управления КСр и учитывает альтернативные варианты реализации ТЦУ МКА, X_3^t — множество вершин, отражающих альтернативные варианты выполнения операций ТЦУ МКА, Γ_3^t — множество дуг графа, отражающих логические и временную взаимосвязи операций ТЦУ МКА; $t \in \mathbb{T}$ — множество моментов времени, на котором можно выделить интервал проведения реконфигурации $T = (t_0, t_f]$.

Кроме того, зададим множество допустимых (с точки зрения пространственно-временных, технических и технологических ограничений) операций попарного отображения указанных выше ДАМГ, описывающих различные структуры КСр, друг на друга в момент времени t :

$$M_{\langle \chi, \chi' \rangle}^t : G_\chi^t \rightarrow G_{\chi'}^t. \quad (2)$$

С учетом вышеизложенного многоструктурное описание состояния КСр в момент времени t можно определить как подмножество декартова произведения множеств элементов, на которых базируются функциональная, техническая и технологическая структуры КСр:

$$S_\delta \subseteq X_1^t \times X_2^t \times X_3^t, \quad \delta = 1, \dots, K_\Delta,$$

где δ — номер многоструктурного описания состояния.

Введем еще множество допустимых операций отображения многоструктурных состояний КСр друг на друга:

$$\Pi_{\langle \delta, \delta' \rangle}^t : S_\delta \rightarrow S_{\delta'}. \quad (3)$$

При этом предполагается, что каждое многоструктурное описание состояния КСр в момент времени t задается операцией композиции соответствующих ДАМГ, описывающих каждый тип структуры. В этом случае задача реконфигурации, как один из вариантов задачи управления структурной динамикой КСр, сводится к поиску такой последовательности выполнения (композиции) операций отображения вида (3) во времени $Y^{t_f} = \Pi_{\langle \delta, \delta_1 \rangle}^{t_1} \circ \Pi_{\langle \delta_1, \delta_2 \rangle}^{t_2} \circ \dots \circ \Pi_{\langle \delta, \delta' \rangle}^{t_f}$, при которой обеспечивается выбор наиболее предпочтительной программы изменения структур АСУ МКА с точки зрения выполнения поставленных целевых задач.

С учетом вышеизложенного совместная задача реконфигурации БС МКА (внутренней и внешней) может быть сформулирована следующим образом: необходимо разработать модели, методы и алгоритмы, позволяющие находить наиболее предпочтительную последовательность структурных описаний состояний КСр $Y_*^{t_f}$, при которой выполняются следующие условия:

$$\mathfrak{J} \left(X_\chi^t, \Gamma_\chi^t, M_{\langle \chi, \chi' \rangle}^t, \Pi_{\langle \delta, \delta' \rangle}^t, t \in (t_0, t_f] \right) \rightarrow \underset{Y_*^{t_f} \in \Delta_g}{\text{extr}}, \quad (4)$$

$$\Delta_g = \left\{ Y^{t_f} \mid Y^{t_f} = \Pi_{\langle \delta, \delta_1 \rangle}^{t_1} \circ \Pi_{\langle \delta_1, \delta_2 \rangle}^{t_2} \circ \dots \circ \Pi_{\langle \delta, \delta' \rangle}^{t_f}; R_\beta(X_\chi^t, \Gamma_\chi^t, M_{\langle \chi, \chi' \rangle}^t, \Pi_{\langle \delta, \delta' \rangle}^t) \leq \tilde{R}_\beta; \beta \in \mathbb{B} \right\},$$

где \mathcal{J} — показатель (набор показателей), характеризующий качество функционирования МКА (к числу таких показателей могут быть отнесены коэффициент технического использования и коэффициент сохранения эффективности); \mathbb{B} — множество ограничений, определяющих функционирование КСр; \tilde{R}_B — заданные величины, входящие в состав этих ограничений; Δ_g — множество программ управления, удовлетворяющих ограничениям на функционирование МКА.

Методология и технологии решения задачи реконфигурации БС МКА. При разработке общей методологии и технологий решения задачи реконфигурации БС МКА авторы [3—5] базировались на двух концепциях проведения современных системно-кибернетических исследований.

1. Концепция комплексного (системного) моделирования БС МКА предполагает разработку и реализацию новых принципов, подходов к проведению полимодельного описания рассматриваемых КСр, а также разработку и комбинированное использование методов, алгоритмов и методик многокритериального анализа, синтеза управленческих решений и выбора наиболее предпочтительных (в том числе по реконфигурации), связанных с созданием, использованием и развитием рассматриваемых объектов в различных условиях динамически изменяющейся внешней и внутренней обстановки. Для реализации этой концепции при разработке модельно-алгоритмического обеспечения каждого экспериментального образца программного модуля были предложены оригинальные полимодельные описания, а также комбинированные методы и алгоритмы манипулирования с данными описаниями при решении конкретных прикладных задач расчета, оценивания и анализа показателей надежности и живучести БС МКА в штатных и заданных условиях [3—6].

2. Концепция проактивного управления СТО, к числу которых относятся МКА и наземный комплекс управления (последний используется для расширения возможностей по управлению БС МКА в условиях возникновения аварийных и штатных ситуаций). Проактивное управление, в отличие от традиционно используемого на практике реактивного управления СТО, ориентированного на оперативное реагирование и последующее недопущение инцидентов, предполагает предотвращение возникновения инцидентов за счет создания в соответствующей системе мониторинга и управления принципиально новых прогнозирующих и упреждающих возможностей при формировании и реализации управляющих воздействий, основанных на методологии и технологиях системного (комплексного) моделирования [3].

В ходе исследований были предложены основные этапы выбора оптимальных программ управления внутренней и внешней реконфигурацией БС МКА, которые выполнялись в рамках более общей задачи управления структурной динамикой (УСД) соответствующих КСр. В соответствии с разработанной обобщенной процедурой решения этой задачи на *первом этапе* должно осуществляться формирование (генерирование) допустимых вариантов многоструктурных описаний макросостояний КСр или, говоря другими словами, должен проводиться структурно-функциональный синтез нового облика КСр, соответствующего складывающейся (прогнозируемой) обстановке.

На *втором этапе* исследования задачи выбора оптимальных программ реконфигурации (в более широкой трактовке управления структурной динамикой) КСр решается совокупность частных взаимосвязанных задач многоуровневой и многоэтапной оптимизации (рис. 1). На рис. 1 приведены разработанные в ходе проекта модели, методы управления структурной динамикой КСр, а также полученные научные и практические результаты. К числу последних относятся два экспериментальных образца программных модулей (ЭО ПМ) „Структурная реконфигурация“, „Функциональная реконфигурация“, обеспечивающих решение соответственно задачи внутренней и внешней реконфигурации.

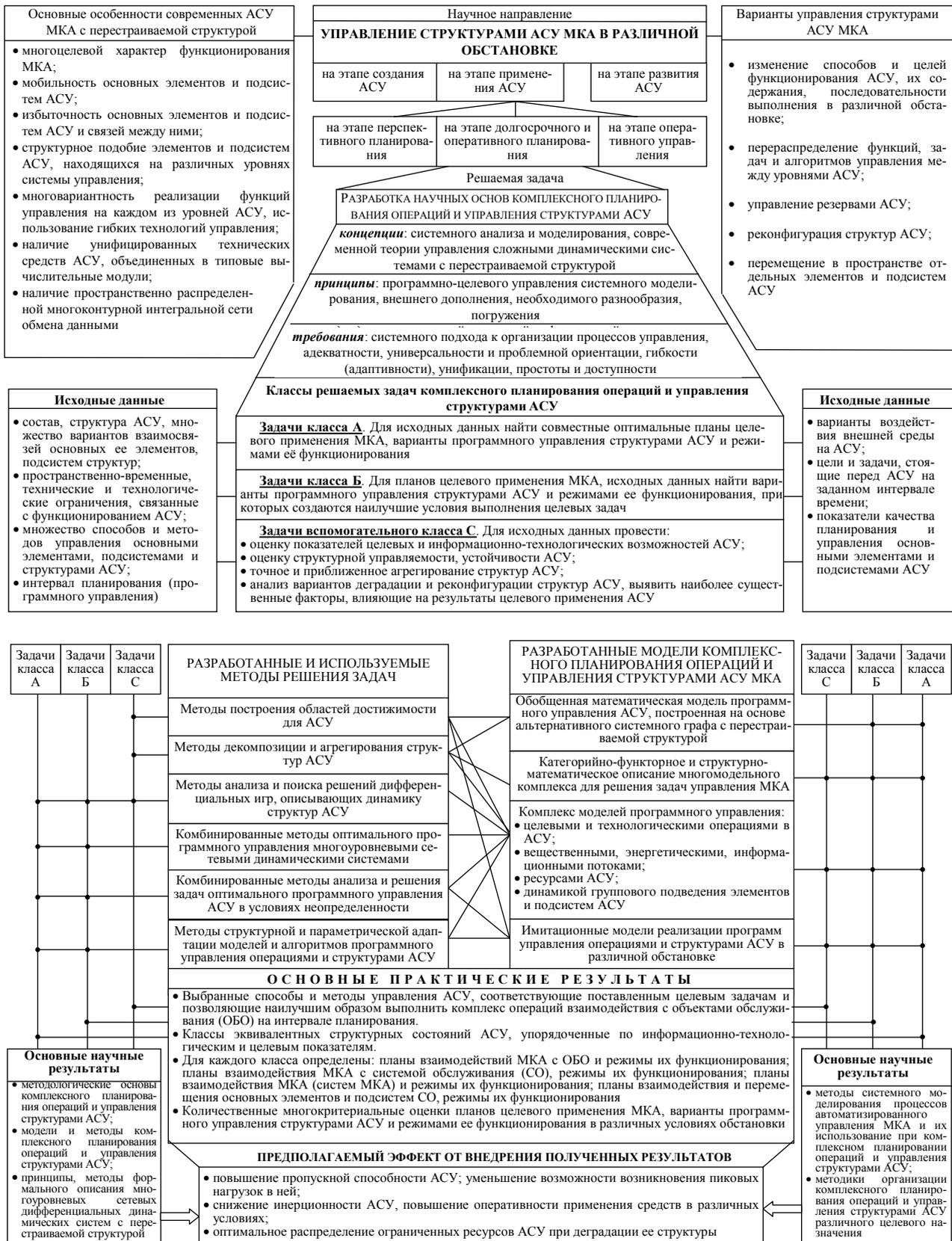


Рис. 1

На рис. 2 приведена обобщенная структурно-функциональная схема созданного в ходе проекта экспериментального образца программного комплекса (ЭО ПК) [4].

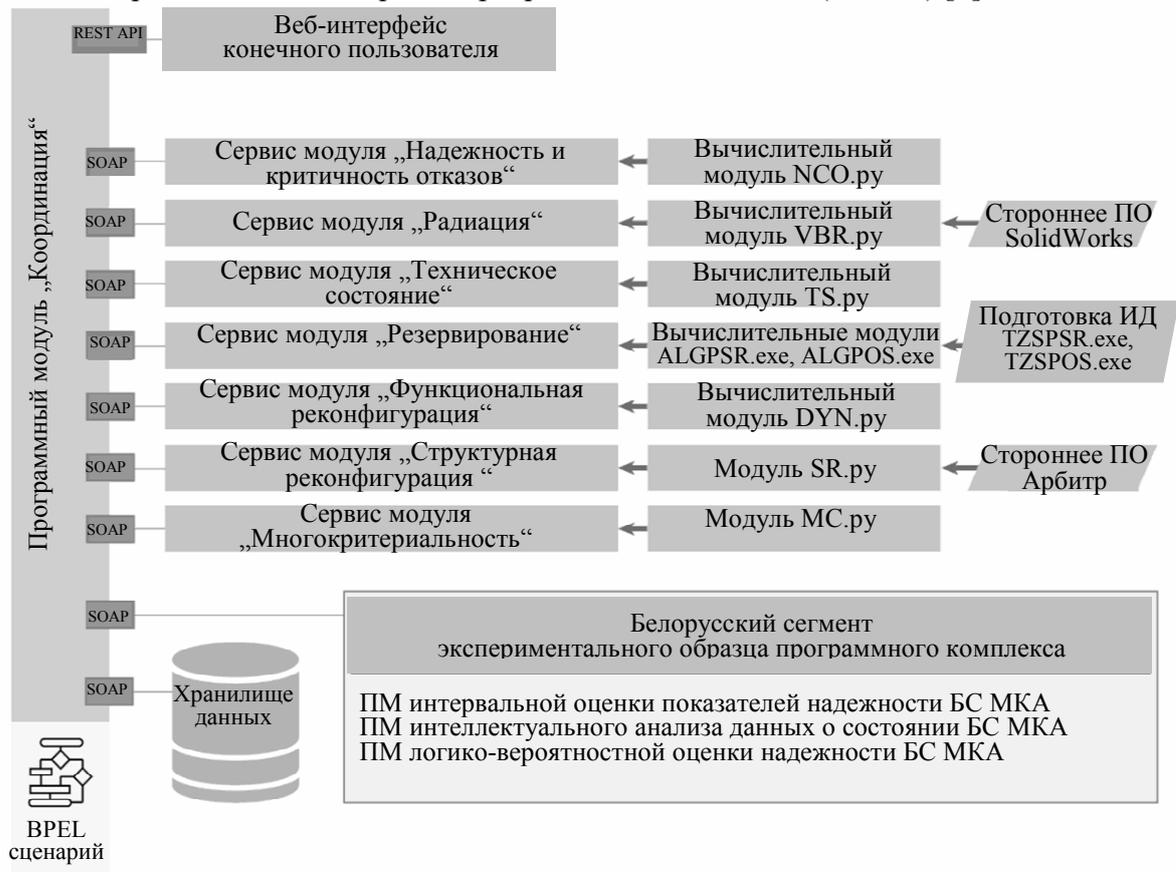


Рис. 2

В целом ЭО ПК представляет собой распределенный гетерогенный программный комплекс, основанный на сервис-ориентированной архитектуре. Каждый расчетный модуль разработан в виде веб-сервиса, а их взаимодействие осуществляется посредством сервисной шины. Запросы на выполнение расчетов формируются с помощью графического пользовательского интерфейса, функционирующего по принципу тонкого клиента и реализованного в виде веб-приложения для интернет-браузера на языке JavaScript с разметкой HTML5 и таблицей стилей CSS3. Сервисная шина построена на базе свободно распространяемого программного обеспечения OpenESB V3.0.5 Standalone Edition. В постоянном режиме функционирует композитное приложение MonitoringSG, обеспечивающее непрерывную работу REST-интерфейса. Композитное приложение содержит приложение на языке BPEL, формирующее логику работы всего вычислительного процесса. Это приложение начинает работу при получении запроса от композитного приложения. Сервисная шина исполняется на Linux-сервере с операционной системой Ubuntu Server 17.04. Веб-сервисы программных модулей выполняют запуск и контроль исполнения соответствующих ПМ. В свою очередь, бесперебойную работу самих веб-сервисов обеспечивает системное свободно распространяемое программное обеспечение Circus.

Для хранения списка доступных массивов согласованных исходных данных, результатов расчетов и вспомогательной информации используется свободно распространяемая СУБД PostgreSQL 9.6.5. Доступ к таблицам осуществляется также посредством сервисной шины с использованием запросов на языке SQL.

Заключение. Предлагаемый в настоящей работе подход к рассмотрению вопросов управления реконфигурацией структуры БС МКА в общем контексте управления ее структурной динамикой позволяет:

1) непосредственно связать общие цели, на достижение которых ориентировано функционирование МКА, с теми целями, которые реализуются в ходе управления структурами МКА и НКУ;

2) обоснованно определить и выбрать соответствующие последовательности решаемых задач и выполняемых операций (действий), входящих в технологический цикл управления МКА (другими словами, синтезировать технологию управления МКА);

3) находить компромиссные решения при распределении ограниченных ресурсов, выделяемых на управление структурной динамикой.

При этом реализация ЭО ПМ по сравнению с существующими средствами автоматизации поиска вариантов гибкого распределения функций управления между БКУ и НКУ МКА дает выигрыш в среднем на 15—20 % по показателю полноты реализации ТЦУ МКА и 10—15 % — по робастности (устойчивости) сформированных планов реконфигурации.

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при финансовой поддержке гранта РФФИ №16-09-00199 (введение и раздел „Решаемые задачи реконфигурации статьи“) и в рамках бюджетной темы № 0073–2014–0009 (раздел „Методология и технологии решения задачи реконфигурации БС МКА“ и заключение).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лохматкин В. В., Куренко В. И. Прогнозирование производительности съемки КА ДЗЗ с учетом надежности бортовых систем // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. Т. 15, № 4(2).
2. Ахметов Р. Н., Макаров В. П., Соллогуб А. В. Концепция автономного управления живучестью автоматических космических аппаратов дистанционного зондирования Земли в аномальных ситуациях // Известия самарского научного центра РАН. 2009. Т. 11, № 3-1. С. 165—176.
3. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
4. Международный проект – СЧ НИР „Мониторинг-СГ-1.4.1-1“ - Разработка методического обеспечения и экспериментального программного комплекса для анализа и прогнозирования надежностных характеристик бортовой аппаратуры маломассогабаритных космических аппаратов на различных этапах жизненного цикла. СПб: СПИИРАН, 2014. 250 с.
5. Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Комплексное моделирование функционирования автоматизированной системы управления навигационными космическими аппаратами // Проблемы управления и информатики. 2002. № 5. С. 1—15.
6. Павлов А. Н. Комплексное моделирование структурно-функциональной реконфигурации сложных объектов // Тр. СПИИРАН. 2013. Вып. 5. С. 143—168.

Сведения об авторах

- Александр Юрьевич Кулаков** — СПИИРАН; лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; E-mail: russ69@bk.ru
- Александр Николаевич Павлов** — д-р техн. наук, доцент; СПИИРАН; лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; E-mail: pavlov62@list.ru
- Семён Алексеевич Потрясаев** — канд. техн. наук; СПИИРАН; лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; E-mail: spotryasaev@gmail.com
- Борис Владимирович Соколов** — д-р техн. наук, профессор; СПИИРАН; лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; E-mail: sokol@iias.spb.su

Поступила в редакцию
26.02.18 г.

Ссылка для цитирования: Кулаков А. Ю., Павлов А. Н., Потрысаев С. А., Соколов Б. В. Методы, алгоритмы и технологии реконфигурации бортовых систем маломассоразмерных космических аппаратов // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 7. С. 596—603.

METHODS, ALGORITHMS, AND TECHNOLOGIES FOR RECONFIGURATION OF ON-BOARD EQUIPMENT OF SMALL-SIZED SPACECRAFTS

A. Yu. Kulakov, A. N. Pavlov, A. N. Potrysaev, B. V. Sokolov

St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS,
199178 St. Petersburg, Russia
E-mail: sokol@iias.spb.su

Methodological, methodical, and technological basis of description and solving problems of reconfiguration of on-board equipment of small-sized spacecraft is proposed. An applied theory of proactive control over structure dynamics of complex technical objects is proposed as a mean for investigation and solving the reconfiguration problems. The problems under consideration are formally described and interpreted as the problems of dynamic structural-functional synthesis of complex technical objects. The developed models, methods, and algorithms are based on constructive implementation of the concepts of integrated modeling and proactive management. Data on the practical implementation of the developed special model-algorithmic support in an experimental sample of the software package are presented.

Keywords: reconfiguration, integrated modelling, proactive control, on-board equipment, small-sized satellite

REFERENCES

1. Lokhmatkin V.V., Kurenko V.I. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2013, no. 4(15). (in Russ.)
2. Akhmetov R.N., Makarov V.P., Sollogub A.V. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2009, no. 3-1(11), pp. 165–176. (in Russ.)
3. Okhtilev M.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M. *Intellectual Technologies of Monitoring and Management of Structural Dynamics of Complex Technical Objects*, Moscow, 2006, 410 p. (in Russ.)
4. *Mezhdunarodnyy proyekt – nauchno-issledovatel'skaya rabota "Monitoring - SG-1.4.1-1" Razrabotka metodicheskogo obespecheniya i eksperimental'nogo programmnoy kompleksa dlya analiza i prognozirovaniya nadezhnostnykh kharakteristik bortovoy apparatury malomassogabaritnykh kosmicheskikh apparatov na razlichnykh etapakh zhiznennogo tsikla* (International Project-Research Work "Monitoring-SG-1.4.1-1" Development of Methodological Support and Experimental Software for the Analysis and Prediction of Reliability Characteristics of Onboard Equipment of Low-Mass-Dimensional Spacecraft at Various Stages of the Life Cycle), St. Petersburg, SPIIRAS, 2014, 250 p. (in Russ.)
5. Sokolov B.V., Yusupov R.M. *Journal of automation and information sciences*, 2002, no. 9-12(34), pp. 19–30.
6. Pavlov A.N. *Trudy SPIIRAN* (SPIIRAS Proceedings), 2013, no. 5, pp. 143–168. (in Russ.)

Data on authors

- Alexander Yu. Kulakov** — St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; E-mail: russ69@bk.ru
- Alexander N. Pavlov** — Dr. Sci., Associate Professor; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; E-mail: pavlov62@list.ru
- Semen A. Potrysaev** — PhD; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; E-mail: spotrysaev@gmail.com
- Boris V. Sokolov** — Dr. Sci., Associate Professor; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; E-mail: sokol@iias.spb.su

For citation: Kulakov A. Yu., Pavlov A. N., Potrysaev A. N., Sokolov B. V. Methods, algorithms, and technologies for reconfiguration of on-board equipment of small-sized spacecrafts. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 7. P. 596—603 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-7-596-603