

МОДЕЛИ, МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ РЕКОНФИГУРАЦИИ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В ДИНАМИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ОБСТАНОВКЕ¹

А.Ю. Кулаков, В.А. Матьяш, А.Н. Павлов, С.А. Потрясаев, Б.В. Соколов
(Санкт-Петербург)

Введение

Одной из основных особенностей таких сложных технических объектов (СТО), как космический аппарат (КА), является то, что их параметры и структуры на различных этапах жизненного цикла изменяются под действием объективных и субъективных, внутренних и внешних причин, или их комбинаций. Другими словами, на практике приходится постоянно сталкиваться со структурной динамикой КА в целом и его бортовой аппаратуры (БА), в частности. В этих условиях для повышения (сохранения, восстановления) уровня работоспособности и возможностей КА необходимо осуществлять управление их структурами [1]. Широкое распространение на практике получил такой вариант управления структурами КА, как реконфигурация [1–4].

Реконфигурация БА КА – это, в общем случае, процесс изменения ее структуры, параметров, технологий функционирования в целях сохранения, восстановления (повышения) до требуемого уровня значений показателей работоспособности и эффективности КА, либо обеспечения минимального снижения уровня значений указанных показателей при деградации функций соответствующей БА и в целом КА. В общем случае должны рассматриваться следующие типы структур: структура целей, функций и задач, решаемых БА КА; ее техническая и топологическая структура; структура программно-математического и информационного обеспечения БА КА; структура технологии управления БА КА.

В качестве основного объекта исследования в рамках предлагаемого доклада рассматривался класс маломассогабаритных КА (МКА). Специфика МКА заключается в том, что к процессу их создания трудно напрямую применить практику использования системы обеспечения надежности ракетно-космической промышленности, связанную с проведением тщательной полноразмерной наземной экспериментальной отработки КА и его систем. В этом случае особую актуальность приобретают задачи разработки модельно-алгоритмических способов и подходов к обеспечению требуемого уровня показателей надежности, живучести и, в целом, эффективности функционирования БА МКА.

Проведенный анализ показал, что существующая стандартная технология реконфигурации БА МКА при отказе одного из её ресурсов включает в себя следующие основные шаги.

Шаг 1. Определение и анализ момента времени и места отказа ресурса, снятие с решения задачи, выполняемой на данном ресурсе, передача задачи на другой ресурс (с сохранением / без сохранения полученных промежуточных результатов).

Шаг 2. Исключение отказавшего ресурса БА из конфигурации МКА, попытка замены его резервным (однотипным), либо резервным другого типа, с близкими функциональными возможностями.

Шаг 3. Исключение связей с отказавшим ресурсом БА, запрет на доступ к нему, а для самого отказавшего ресурса – попытка его восстановления.

В том случае, если на отказавшем ресурсе решалась высокоприоритетная задача, которая при передаче на другие ресурсы начинает конфликтовать с задачами, закреплёнными за данным ресурсом, то в зависимости от дисциплины обслуживания происходит прерывание

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-00199).

выполнения менее приоритетных задач, либо просто снятие их с решения. Описанная технология в большинстве существующих МКА реализована на микроуровне (на уровне элементов и блоков МКА) с использованием аппаратно-программных средств). Данную реконфигурацию в ряде случаев называют «слепой реконфигурацией», так как в ходе её реализации, как правило, не проводятся следующие операции: учёт и анализ текущих характеристик задач, решаемых в БА МКА и выполняемых функций; анализ и оценивание текущего состояния БА МКА в целом; оперативный расчёт, оценивание и анализ целевых и информационно-технических возможностей БА МКА для обоснованного перераспределения функций обработки информации и управления МКА между её работоспособными элементами и подсистемами.

В реальных ситуациях отказ одного вида ресурса БА МКА может вести к отказу или снижению эффективности функционирования других видов ресурсов. При этом замена отказавшего ресурса другим видом ресурса требует формирования принципиально новых работоспособных конфигураций БА МКА. В связи со сказанным в рассматриваемой статье предложена методология и технология перехода от узкой (традиционной) интерпретации процессов реконфигурации БА МКА к их широкой интерпретации в рамках развиваемой авторами новой прикладной теории проактивного мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов (в том числе и МКА).

Результаты исследований

В результате выполненных исследований был разработан взаимосвязанный комплекс моделей, методов и алгоритмов, обеспечивающий решение следующих задач:

- автоматизированное моделирование процессов управления реконфигурацией БА МКА;
- автоматизированное формирование стратегий реконфигурации БА МКА;
- автоматический контроль и оценивание текущего состояния БА МКА;
- автоматическое (автоматизированное) планирование реконфигурации БА МКА;
- формирование и выдача команд на реконфигурацию бортовых систем и восстановление работоспособности БА маломассогабаритных КА.

Для решения перечисленных задач с единых методологических и методических позиций была предложена новая модификация ранее разработанных иерархических вычислительных G-моделей представления и обработки данных, информации и знаний. Эти модели обеспечили на концептуальном, модельно-алгоритмическом, информационном и программном уровнях детализации согласование математических (аналитико-имитационных) моделей управления реконфигурацией (в общем случае - структурной динамикой) БА МКА с их логико-алгебраическими и логико-лингвистическими аналогами (моделями), построенными на основе интеллектуальных информационных технологий.

Доработка иерархических вычислительных G-моделей представления и обработки данных, информации и знаний проводилась на основе предлагаемой исполнителями проекта динамической интерпретации сетей Петри (в частном случае асинхронных автоматов, используемых для решения задачи идентификации состояния БА МКА) и комбинирования указанного математического аппарата с логико-динамическими моделями программного управления комплексами операций, ресурсами и структурами БА МКА. В последние годы сети Петри завоевали широкое признание, прежде всего, как удобный и наглядный инструмент описания моделей многоуровневых процессов параллельного, потокового, пространственно-распределённого, асинхронного преобразования информации. Ранее выполненные исследования показали, что, используя предлагаемую логико-динамическую интерпретацию сетей Петри, как динамических альтернативных системных графов с

перестраиваемой структурой, можно на конструктивном уровне осуществить интеграцию таких важнейших классов моделей подготовки и принятия решений при реконфигурации БА МКА, как: вычислительные модели, используемые для описания алгоритмов оперативного планирования и управления реконфигурацией БА МКА; экспертные модели для описания моделей оценивания состояния БА МКА; а также диалоговые модели для описания человеко-машинного взаимодействия с разрабатываемым комплексом моделей.

Предложенная методология и технология комплексного моделирования процессов реконфигурации БА МКА позволили в рамках сервис-ориентированного подхода и соответствующей информационной архитектуры объединить ранее разработанное и предлагаемое методическое и программное обеспечение наземного и бортового функциональных модулей восстановления работоспособности БА МКА в единую систему. При этом были спроектированы и реализованы следующие конкретные модели, методы и алгоритмы: модели неуправляемого движения МКА; модели управления технологическими операциями, связанными с подготовкой и проведением реконфигурации БА МКА; модели программного управления ресурсами (электроэнергетическими, топливными, информационными); модели управления структурами (топологической, технической, функциональной) БА МКА и формирования стратегий (технологий) реконфигурации БА МКА; модели формирования сценариев возмущающих воздействий на БА МКА; модели оперативного контроля и оценивания состояния БА МКА; модели формирования и выдачи команд на реконфигурацию бортовых систем и восстановления работоспособности БА МКА; методы и алгоритмы комплексного (аналитико-имитационного) моделирования процессов управления реконфигурацией БА МКА в динамически изменяющейся обстановке на основе языков сценарного моделирования, методы и алгоритмы формирования и выдачи команд на реконфигурацию БА МКА на основе логико-динамического описания данных процессов; методы и алгоритмы формирования и выдачи команд на реконфигурацию БА МКА на основе логико-динамического описания данных процессов;

Кроме того, были разработаны следующие прототипы программного обеспечения: прототип программного комплекса моделирования процессов управления реконфигурацией бортовых систем маломассогабаритных КА; прототип программного комплекса формирования стратегий (планов) реконфигурации бортовых систем маломассогабаритных КА методы и алгоритмы формирования и выдачи команд на реконфигурацию БА МКА на основе логико-динамического описания данных процессов; прототип программного комплекса автоматического контроля и оценивания текущего состояния бортовых систем КА; прототип программного комплекса автоматического планирования реконфигурации бортовых систем КА; прототип программного комплекса формирования и выдачи команд на реконфигурацию бортовых систем и восстановления работоспособности маломассогабаритных КА.

Для конкретизации исходных данных и сценариев моделирования проверка разработанного модельно-алгоритмического и программного обеспечения была проведена на примере бортовой аппаратуры системы управления движением (СУД) МКА, решающим задачи радиолокационного наблюдения Земной поверхности [3–4].

Проверка функциональности перечисленных прототипов программных комплексов проводилась для следующих сценариев выполнения реконфигурации БА МКА: 1) «стандартная» реконфигурация, которая проводится только по командам с НКУ в зонах радиовидимости МКА, 2) «стандартная» реконфигурация, проводимая автоматически СУД, кроме аварийной ситуации, когда необходим анализ нештатной ситуации в центре управления полетом на Земле, 3) структурно-функциональная реконфигурация, проводимая автоматически СУД МКА. Была проведена серия экспериментов, которая подтвердила преимущества структурно-функциональной реконфигурации СУД МКА по сравнению со «стандартной» реконфигурацией.

Результаты аналитико-имитационного моделирования представлены в виде таблиц 1 и 2. В указанных таблицах эксперимент №1 проводился по первому сценарию, эксперимент №2 по второму сценарию, эксперимент №3 по третьему сценарию с применением «жадного» алгоритма при выборе рабочих конфигураций, эксперимент №4 по третьему сценарию с применением алгоритма случайного направленного поиска.

Таблица 1
Значение основных показателей эффективности функционирования КА

Т№ п/п	Число успешно проведённых сеансов целевой аппаратуры (СЦА) МКА	Число СЦА без учёта сбоев и отказов БА	Объём информации переданный на наземные средства без учёта сбоев и отказов БА	Время работы по целевому назначению, ч.	Общее время работы «экстренной» схемы ориентации, ч.
1.	1081	1454	1243	547	602
2.	1262	1497	1277	640	739
3.	1669	1827	1610	845,9	912,9
4.	1719	1950	1732	868,9	973,9

По результатам моделирования видно, что применение предложенных алгоритмов структурно-функциональной реконфигурации показывают большую эффективность по сравнению алгоритмами стандартной реконфигурации. Так, число успешно проведённых сеансов увеличилось на ~50% по сравнению со «стандартной» реконфигурацией, проводимой с НКУ, и на ~30% по сравнению со «стандартной» реконфигурацией, проводимой в автоматическом режиме.

Таблица 2
Значения комплексных показателей надёжности КА

(коэффициент технического использования и коэффициент сохранения эффективности)

№№ п/п	$K_{т.и.}^0 = M\left\{\frac{T_{GA}}{T_A}\right\}$	$K_{т.и.}^1 = M\left\{\frac{T_D}{T_A}\right\}$	$K_{с.э.}^0 = M\left\{\frac{F_{GA}}{F'_{GA}}\right\}$	$K_{с.э.}^1 = M\left\{\frac{F_D}{F'_D}\right\}$
11	0,56	0,63	0,54	0,6
22	0,65	0,73	0,63	0,73
33	0,86	0,92	0,83	0,90
44	0,88	0,96	0,85	0,96

Значения комплексных показателей надёжности увеличиваются для коэффициента технического использования и для коэффициента сохранения эффективности для проведённых сеансов (второй и четвёртый столбец таблицы 2) на ~45% и ~25% соответственно для реконфигурации, проводимой с НКУ, и реконфигурации в автоматическом режиме.

Заключение

В целом в результате выполненных исследований были получены следующие научные и практические результаты: во-первых, применительно к современным МКА реконфигурация следует рассматривать не только как технологию управления структурами БА КА для компенсации отказов, но и как технологию управления, направленную на повышение эффективности функционирования БА МКА; во-вторых, для реализации указанной концепции реконфигурации БА МКА необходимо в дальнейшем разработать такие средства формализации (модели, методы, алгоритмы, прототипы специального программного обеспечения (СПО), которые позволили бы на конструктивной основе связывать процессы реконфигурации БА МКА с процессами её использования по целевому назначению на различных этапах жизненного цикла.

Разработанные прототипы СПО подтвердили преимущества применения предлагаемой авторами структурно-функциональной реконфигурации на борту МКА.

Литература

1. **Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.** Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
2. **Кирилин А.Н., Ахметов Р.Н., Сологуб А. Н., Макаров В. П.** Методы обеспечения живучести низкоорбитальных автоматических КА зондирования Земли: математические модели, компьютерные технологии. М.: Машиностроение, 2010. 384 с.
3. **Кулаков А.Ю.** Модель оценивания расхода топлива космического аппарата с учётом нештатных ситуаций // Известия ВУЗов. Приборостроение. 2014. Т. 57, №11. С. 30–34.
4. **Кулаков А.Ю., Павлов А.Н., Павлов Д.А.** Функциональная реконфигурация чувствительных элементов СУД КА // Труды СПИИРАН, 2013. Выпуск 5(28). С. 169–181.