

В.Н. Калинин, А.Ю. Кулаков, А.Н. Павлов, С.А. Потрясаев,
Б.В. Соколов

МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ СИНТЕЗА ТЕХНОЛОГИЙ И ПРОГРАММ УПРАВЛЕНИЯ РЕКОНФИГУРАЦИЕЙ БОРТОВЫХ СИСТЕМ МАЛОМАССОРАЗМЕРНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Калинин В.Н., Кулаков А.Ю., Павлов А.Н., Потрясаев С.А., Соколов Б.В. Методы и алгоритмы синтеза технологий и программ управления реконfigurацией бортовых систем маломассоразмерных космических аппаратов.

Аннотация. В современных условиях в сфере создания и применения существующих и перспективных космических средств (КСр) приобретают особую актуальность вопросы автономности и живучести при разработке и эксплуатации маломассоразмерных космических аппаратов (МКА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Специфика МКА заключается в том, что к процессу их создания трудно напрямую применить стандартную практику использования системы обеспечения надежности, принятую в ракетно-космической промышленности, из-за отсутствия возможности обеспечить полное структурное резервирование его бортовых систем (БС), связанное с массового-габаритными и другими ограничениями. В этом случае особую актуальность приобретают задачи разработки модельно-алгоритмических способов и подходов к обеспечению требуемого уровня показателей структурной надежности, живучести и, в целом, эффективности функционирования БС МКА. Проблема повышения уровня показателей автономности, живучести, эффективности функционирования сложных технических объектов (СТО), к которым, в частности, относятся МКА, в научной литературе рассматривается в совокупности с решением задач контроля, оценивания и технического диагностирования состояния СТО, проведения реконfigurации (структурной, функциональной, структурно-функциональной) структур СТО, управления ее резервами, альтернативного и многорежимного управления, анализа отказоустойчивости и катастрофоустойчивости СТО. Однако, все перечисленные исследования носят разрозненный и разобщенный характер как на методологическом, так и методическом и технологическом уровнях.

В статье приводится обобщенное описание разработанных авторами комбинированных методов и алгоритмов решения задач синтеза технологий и программ управления реконfigurацией БС для повышения живучести МКА. При этом данные задачи и решаются не изолированно, а комплексно в рамках общей проблемы проактивного управления структурной динамикой МКА с использованием, либо без использования средств НКУ, что обеспечивает оперативность, обоснованность, полноту, замкнутость и непротиворечивость синтезируемых управленческих решений. Новизна предложенного в статье подхода состоит в том, что ее авторы, базируясь на сформулированных ими концепциях комплексного (системного) моделирования, проактивного управления структурной динамикой БС МКА, а также интеллектуализации процессов проактивного управления БС МКА, разработали методы и алгоритмы синтеза технологий и программ управления реконfigurацией БС МКА, обеспечивающие, во-первых, ситуационный выбор оптимальной последовательности выполнения операций и распределения ресурсов МКА с использованием и без использования средств НКУ, и, во-вторых, эффективное парирование не только расчетных, но и нерасчетных аварийных полетных ситуаций (АПС), а также оперативное восстановление работоспособности его БС. Конструктивность предложенного подхода иллюстрируется на примере решения задачи гибкого перераспределения задач обработки информации между БС МКА и НКУ МКА.

Ключевые слова: синтез технологий управления, проактивное управление реконfigurацией, показатели живучести и эффективности функционирования маломассоразмерного космического аппарата

1. Введение. Одной из основных особенностей таких сложных технических объектов (СТО), как космические аппараты (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. Широкое распространение на практике получил такой вариант управления структурами КА, как реконфигурация [1-4].

Реконфигурация бортовых систем (БС) КА – это, в общем случае, процесс изменения их 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, соответствующих БС и в целом КА. При этом в общем случае должны рассматриваться следующие типы структур: структура целей, функций и задач, решаемых БС КА; их техническая и топологическая структура; структура программно-математического и информационного обеспечения БС КА; структура технологии управления БС КА [5-7].

Для определенности в статье в качестве основного объекта исследования рассматриваются не вообще абстрактные КА, а класс маломасштабных КА (МКА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Специфика МКА заключается в том, что к процессу их создания трудно напрямую применить практику использования системы обеспечения надежности, принятую в ракетно-космической промышленности и состоящую в проведении тщательной полноразмерной наземной экспериментальной отработки МКА и его систем, использовании систем выборочного производственного контроля и управления качеством продукции крупного серийного производства, в применении полного структурного резервирования, исключающего полный отказ МКА при отказе любого электрорадиоизделия и даже отдельного прибора. В этом случае особую актуальность приобретают задачи разработки модельно-алгоритмических способов и подходов к обеспечению требуемого уровня показателей структурно-функциональной надежности, живучести и, в целом, эффективности функционирования БС МКА [8]. В широком смысле под *структурно-функциональной живучестью* МКА понимается такое свойство рассматриваемого объекта, которое позволяет ему в условиях непредска-

зуюемого воздействия возмущающих факторов (например, факторов космического пространства) сохранять в определенных пределах качество своего целевого функционирования (или восстанавливать такую способность) путем изменения (формирования) соответствующих параметров и структур(конфигураций). Важным и неотъемлемым условием изучения возможностей МКА является проведение анализа и оценивания архитектуры его структурно-функциональных состояний, описывающих как технические, так и технологические особенности управления МКА.

Далее под показателями живучести и эффективности функционирования МКА будем понимать, как структурно-функциональные, так и структурно-технологические показатели, а также показатели качества и эффективности распределения функции управления между БС МКА при их конфигурации (реконфигурации) и выполнения поставленных перед МКА целевых задач. В отчете [8] приведены примеры конкретных показателей структурно-функциональной живучести БС МКА, в качестве которых рассматривались коэффициенты структурной живучести и структурной деградации БС МКА, интегральные показатели структурно-функциональной живучести и деградации БС МКА, для расчета которых использовалась предложенная профессором Павловым А.Н. концепция генома структуры БС МКА.

Цель написания данной статьи состоит в обобщенном описании разработанных авторами новых методов и алгоритмов синтеза технологий и программ управления реконфигурацией БС МКА, обеспечивающих (в отличие от существующих подходов), во-первых, исходя из поставленных целей программы полета, оперативный ситуационный выбор оптимальной последовательности выполнения операций и распределения ресурсов МКА с использованием и без использования средств наземного комплекса управления (НКУ), и, во-вторых, эффективное парирование не только расчетных, но и нерасчетных аварийных полетных ситуаций (АПС), а также оперативное гарантированное восстановление работоспособности его БС.

2. Современное состояние исследований задач управления реконфигурацией сложных технических объектов. В данном подразделе проведем критический анализ существующих подходов к решению проблем управления реконфигурацией сложных технических объектов, одновременно предполагая, что МКА и его БС относятся к указанному классу объектов. Известно, что при решении проблемы повышения сроков активного функционирования и эффективности применения СТО в условиях воздействий возмущающих факторов естественного и искусственного происхождения с использованием концепции проактивной компенсации деструктивных воздействий внешней среды должны рас-

смагиваться следующие этапы управления СТО: учёт и анализ особенностей и специфики функционирования СТО; мониторинг текущего состояния; оперативное оценивание количественных и качественных показателей целевых и информационно-технических возможностей СТО для выбора обоснованного плана реконфигурации его основных структур. В самом общем случае реконфигурация СТО – это процесс изменения структурно-параметрических характеристик объекта в целях сохранения, исправления (или повышения) до требуемого уровня значений показателей эффективности СТО, либо обеспечения наименьшего снижения уровня значений указанных показателей при ухудшении функций, соответствующих ЭП СТО [1-5,8].

Переходя от СТО уже конкретно к БС МКА, следует указать, что в последние десятилетия в широком спектре задач современной космической кибернетики [3] сформировалось новое направление исследований, связанное не с традиционным формированием управляющих воздействий на элементы космического аппарата (КА) при выполнении им целевых задач информационного взаимодействия с элементами окружающей физической среды, а с управлением структурой бортовых и наземных аппаратно-программных комплексов в условиях различных возмущающих воздействий в интересах эффективного решения поставленных целевых задач функционирования КА.

При этом под современной космической кибернетикой будем понимать междисциплинарную науку о проактивном (упреждающем) управлении разнотипными группировками КА как сложными подвижными системами, предназначенными для информационного, вещественного и энергетического взаимодействия с окружающей средой и/или другими подобными системами [3].

При этом важное место среди данных задач занимают задачи реконфигурации бортовых систем КА [5].

Как правило, при решении задач реконфигурации БС МКА применяют технологию «слепой» реконфигурации, в рамках проведения которой при нарушениях функционирования соответствующих элементов и подсистем (ЭП) БС МКА с целью сохранения наиболее существенных функций БС МКА или допустимых условий, влияющих на работоспособность, отказываются от других функций или части работоспособных элементов. Среди технологий «слепой» реконфигурации [3-8] принято выделять три варианта.

Вариант 1. Множество задач, которые выполняют ЭП БС МКА, [5] разбивается на классы с равными характеристиками. Каждый класс задач решается на одном ЭП. В случае отказа ЭП выполняемый им класс задач передается на ЭП, где решаются задачи с наиболее низкими предпочтениями. В случае невозможности решения задач

объединенных классов, задачи класса с низким предпочтением снимаются с решения.

Вариант II. В отличие от рассмотренного варианта I ЭП осуществляют информационный обмен посредством некоторой сети передачи данных [3,8]. Каждый ЭП имеет аппаратно-программные средства, а БС МКА – общие ресурсы для решения заданного множества целевых задач программы полета. Причем ЭП могут быть специализированными (выполнять некоторую функцию) или универсальными (несколько функций БС). Для выполнения задач программы полета имеется набор процедур. В данных условиях обобщенный вариант реконфигурации БС МКА [3,8] можно представить следующим образом.

С учетом технологических, технических и ресурсных ограничений в начальный момент времени задачи и потоки информационного обмена, называемые собственными, закрепляются за ЭП БС МКА [4,5,8]. В случае отказа некоторого множества ЭП БС МКА объект переходит в другое макроструктурное состояние. При этом предлагаются два алгоритма реконфигурации.

Алгоритм 1 – собственные задачи и связанные с ними информационные потоки отказавших ЭП перераспределяются между работоспособными ЭП.

Алгоритм 2 - в новом макроструктурном состоянии осуществляется перепланирование всех решаемых БС МКА задач.

Для повышения **живучести** БС МКА по результатам координационного планирования осуществляется итоговое размещение в различных ЭП резервных копий процедур выполняемых функций. При переходе БС МКА в другое макросостояние в соответствии с координационным планом осуществляется активизация резервных копий процедур работоспособными ЭП.

Вариант III. Предлагается задачу реконфигурации БС МКА в условиях действия деструктивных воздействий решать с применением методов в рамках многоэтапного стохастического программирования [5,8]. При этом выбор начальных планов распределения задач осуществлять таким образом, чтобы последующие результаты координационного планирования позволили рационально использовать ресурсы БС МКА, необходимые для компенсации неблагоприятных деструктивных воздействий.

В последнее время появился целый ряд исследований, базирующийся на байпасном подходе. Идея данного подхода состоит в том, чтобы при возникновении аномальной полетной ситуации (АПС) использовать обходные (альтернативные, возможные) пути реализации

основных функций БС МКА. В основе байпасного подхода лежит методология адаптивно-компенсаторной регенерации функций управления БС МКА, представленная в работах [1-2], либо методология адаптивно-вариабельного управления полётом МКА, представленная в работах [9,10]. В рамках первой из указанных методологий основная управленческая задача состоит в том, чтобы осуществить нейтрализацию последствий, вызванных отказами ЭП, для обеспечения живучести БС МКА с возможностью реанимации целевого функционирования [1-2]. При этом живучесть БС МКА может обеспечиваться за счёт байпасов, формируемых на основе структурных, функциональных, информационных, временных ресурсов объектов. Вместе с тем, при формировании байпасов можно задействовать естественные ресурсы, присущие некоторым системам по определению, или возникающие при целенаправленном взаимодействии различных подсистем (синергетического типа). В самом общем случае в качестве байпасов могут выступать: байпасные каналы в подсистемах объектов, байпасные контуры в составе объекта, резервные БС МКА как байпасы для выполнения целевых задач космической системы наблюдения.

В ряде зарубежных работ предлагаются подходы по своему содержанию близкие к описанному байпасному подходу [11-16]. В настоящее время там особой популярностью пользуется концепция FDIR (Fault Detection (Обнаружение (отказов)), Isolation (Локализация) and Recovery (Восстановление)). Исследования и разработки данной концепции сконцентрированы на системном уровне беспилотных космических аппаратов: внедрение инновационных механизмов наряду с апробированными методами стандартного FDIR, которые позволили бы снизить количество переходов в безопасные режимы и увеличить время работы МКА по назначению [11,15]. В иностранной литературе дается много определений механизмов FDIR, но, как правило, современные FDIR системы выполняют следующие задачи [11, 15]: обнаружение неисправностей, то есть определение присутствия ошибок в системе и времени их возникновения; локализация неисправности (и ее классификация, то есть определение типа, критичности и местонахождения неисправности); устранение неисправности, то есть выбор наилучших действий по восстановлению с учётом критичности неисправности и возможных последствий.

Исходя из особенностей проектирования МКА, традиционные функции FDIR системы организованы по иерархическому принципу. Большинство исследований, связанных с FDIR системами, концентрируются на работе по обнаружению отказов на уровне составных частей или бортовых систем (БС) (уровень 0 – 3), например, определения неисправного рулевого двигателя или двигателей-маховиков. На уровне БС

в исследованиях уделяют основное внимание подсистеме энергопитания или системе управления движением. Исследования лишь немногих авторов выходят за пределы задач обнаружения и локализации отказов на уровне БС с учетом её восстановления.

Новый импульс в развитии концепция FDIR системы получила в настоящее время за счет обогащения ее технологиями киберфизических систем и промышленного Интернета вещей, основные элементы которых представлены в работах [17-19]. Для того, чтобы данные технологии можно было реализовать в ракетно-космической сфере они должны быть также дополнены новыми технологиями решения задач планирования и составления расписания работы бортовых систем КА и других классов летательных аппаратов (ЛА), о которых речь идет в работах [20-25].

Методика вариабельного управления сложным процессом – это способ, заключающийся в проведении ситуационной адаптации управления полётом МКА, обнаружением синергетических явлений, определением влияния закономерностей их самоорганизации и саморазвития в процессах для равномерности и уменьшения интенсивности расхода ресурсов, а также получения новых дополнительных ресурсов. При этом ситуационная адаптация - это проактивное управление путём выбора с учётом текущего состояния БС одного из заранее разработанных вариантов развития бортовых процессов с целью наиболее эффективного ресурсного обеспечения полёта.

Завершая анализ существующих подходов, требуется указать, что все они носят достаточно несогласованный бессистемный характер. Это выражается, прежде всего в том, что авторам представленных подходов не удалось с единых позиций подойти к решению базовых проблем динамического многокритериального структурно-функционального синтеза как технологий, так и программ управления конфигурации и реконфигурации БС МКА с использованием и без использования средств НКУ, а также проблем проактивного управления реализацией указанных программ.

Второй недостаток рассмотренных подходов состоит в том, что все они ориентированы на парирование расчетных АПС, т.е. тех ситуаций, которые наблюдались ранее, или которые были сгенерированы (смоделированы) заранее и для которых были разработаны соответствующие ситуационные программы выхода из них с целью восстановления требуемого уровня работоспособности. В случае нерасчетных АПС в рамках данных подходов (при отсутствии какого-либо резерва) в большинстве случаев осуществлялся переход в заранее предусмотренные устойчивые состояния (например, состояние ориентированного дежурного полета (ОДП), либо неориентированного полета (НП)).

3. Формальное описание решаемой проблемы. Проведенные авторами статьи исследования возможных путей решения рассматриваемой проблемы динамического многокритериального структурно-функционального синтеза как технологий, так и программ управления реконфигурацией БС МКА с использованием и без использования средств НКУ показали, что трудности ее решения связаны с тем, что необходимо одновременно учитывать, во-первых, большое число пространственно-временных, технических и технологических ограничений, объективно изменяющихся под действием внешних и внутренних причин, во-вторых, требуется постоянно согласовывать результаты решения задач структурного и функционального синтеза перечисленных выше технологий и программ управления БС МКА и средств НКУ в рамках разработанного полимодельного комплекса, о котором речь пойдет далее [4-8].

Для формального описания рассматриваемой проблемы в ряде работ авторов были введены следующие векторы и множества [6-7]:

$$\mathbf{x}(t) = \left\| \mathbf{x}^{(д)T}, \mathbf{x}^{(о)T}, \mathbf{x}^{(к)T}, \mathbf{x}^{(р)T}, \mathbf{x}^{(н)T}, \mathbf{x}^{(е)T}, \mathbf{x}^{(с)T}, \mathbf{x}^{(в)T} \right\|^T, \quad (1)$$

$$\mathbf{y}(t) = \left\| \mathbf{y}^{(д)T}, \mathbf{y}^{(о)T}, \mathbf{y}^{(к)T}, \mathbf{y}^{(р)T}, \mathbf{y}^{(н)T}, \mathbf{y}^{(е)T}, \mathbf{y}^{(с)T}, \mathbf{y}^{(в)T} \right\|^T; \quad (2)$$

$$\mathbf{u}_{пр}(t) = \left\| \mathbf{u}_{пр}^{(д)T}, \mathbf{u}_{пр}^{(о)T}, \mathbf{u}_{пр}^{(к)T}, \mathbf{u}_{пр}^{(р)T}, \mathbf{u}_{пр}^{(н)T}, \mathbf{u}_{пр}^{(е)T}, \mathbf{u}_{пр}^{(с)T}, \mathbf{u}_{пр}^{(в)T} \right\|^T; \quad (3)$$

$$\mathbf{v}(\mathbf{x}(t), t) = \left\| \mathbf{v}^{(д)T}(\mathbf{x}(t), t), \mathbf{v}^{(о)T}(\mathbf{x}(t), t), \mathbf{v}^{(к)T}(\mathbf{x}(t), t), \mathbf{v}^{(р)T}(\mathbf{x}(t), t), \right. \\ \left. \mathbf{v}^{(н)T}(\mathbf{x}(t), t), \mathbf{v}^{(е)T}(\mathbf{x}(t), t), \mathbf{v}^{(с)T}(\mathbf{x}(t), t), \mathbf{v}^{(в)T}(\mathbf{x}(t), t) \right\|^T; \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\xi}(t) = \left\| \boldsymbol{\xi}^{(д)T}, \boldsymbol{\xi}^{(о)T}, \boldsymbol{\xi}^{(к)T}, \boldsymbol{\xi}^{(р)T}, \boldsymbol{\xi}^{(н)T}, \boldsymbol{\xi}^{(е)T}, \boldsymbol{\xi}^{(с)T}, \boldsymbol{\xi}^{(в)T} \right\|^T; \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\beta}(t) = \left\| \boldsymbol{\beta}^{(д)T}, \boldsymbol{\beta}^{(о)T}, \boldsymbol{\beta}^{(к)T}, \boldsymbol{\beta}^{(р)T}, \boldsymbol{\beta}^{(н)T}, \boldsymbol{\beta}^{(е)T}, \boldsymbol{\beta}^{(с)T}, \boldsymbol{\beta}^{(в)T} \right\|^T, \quad (6)$$

где $\mathbf{x}(t)$, $\mathbf{y}(t)$, $\mathbf{u}_{пр}(t)$, $\mathbf{v}(\mathbf{x}(t), t)$, $\boldsymbol{\xi}(t)$, $\boldsymbol{\beta}(t)$ соответственно обобщённые векторы состояния, выходных характеристик логико-динамической системы, описывающей процессы управления структурной динамикой БС МКА без и с использованием НКУ; обобщённые векторы программных управлений БС МКА без и с использованием НКУ; вектор возмущающих воздействий, имеющих как целенаправленный, так и нецеленаправленный характер; вектор структурных параметров (характеристик) БС МКА, определяющих её облик.

Все указанные векторы, должны принадлежать заданным областям (см. [6]):

$$\mathbf{u}_{\text{пр}}(t) \in \mathbf{Q}^{(\text{np})}(\mathbf{x}(t), t), \quad \mathbf{v}(\mathbf{x}(t), t) \in \mathbf{V}(\mathbf{x}(t), t), \quad (7)$$

$$\xi(t) \in \Xi(\mathbf{x}(t), t), \quad \beta \in \mathbf{B}, \quad (8)$$

$$\mathbf{x}(t) \in \mathbf{X}^{(\text{tp})}(t), \quad (9)$$

где $\mathbf{Q}^{(\text{np})}(\mathbf{x}(t), t)$, $\mathbf{V}(\mathbf{x}(t), t)$, $\Xi(\mathbf{x}(t), t)$, \mathbf{B} , $\mathbf{X}^{(\text{tp})}(t)$ соответственно заданная область допустимых программных управлений (планов конфигурации и реконфигурации БС МКА); область допустимых управляющих воздействий, реализуемых в реальном масштабе времени (РМВ) и связанных с выполнением ранее составленных планов конфигурации и реконфигурации БС МКА в интересах повышения их живучести; область допустимых возмущающих воздействий, задаваемых с помощью тех или сценариев; область допустимых значений структурных параметров; – область допустимых текущих значений вектора состояния структурной динамики БС МКА.

В этом случае управляемая структурная динамика БС МКА без и с использованием НКУ может быть задана как в аналитическом, так и в алгоритмическом виде (возможен комбинированный вариант). В общем виде данную управляемую структурную динамику зададим в виде следующих соотношений:

$$\mathbf{x}(t) = \varphi(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}_{\text{пр}}(t), \mathbf{v}(\mathbf{x}(t), t), \xi(t), \beta, t), \quad (10)$$

$$\mathbf{y}(t) = \psi(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}_{\text{пр}}(t), \mathbf{v}(\mathbf{x}(t), t), \xi(t), \beta, t). \quad (11)$$

Ограничения на значения обобщенного фазового вектора, описывающего состояние рассматриваемой сложной организационно-технической системы в начальный – T_0 и конечный – T_f моменты времени запишем в следующем виде:

$$\mathbf{x}(T_0) \in X_0(\beta), \quad \mathbf{x}(T_f) \in X_f(\beta). \quad (12)$$

С помощью данных ограничений при возникновении АПС задается, во-первых, то состояние, в которое попадают БС МКА в результате появления расчетной (нерасчетной) АПС. Сведения об этом состоянии БС МКА поступает как результат работы модельно-алгоритмического

обеспечения решения задач контроля, оценивания и диагностики состояния БС МКА. Второе крайнее условие в выражении (12) задает то состояние БС МКА, в которое надо (либо возможно) перевести БС МКА в результате выполнения их операций по конфигурации (реконфигурации) соответствующих структур.

Проведенный анализ показывает, что соотношения (7)-(12) задают множество стратегий $\Delta_{\text{эф}}$ – (допустимых альтернатив, способов применения, управляющих воздействий, в нашем случае – технологий и программ конфигурации и реконфигурации БС МКА с использованием или без использования средств НКУ и т.п.).

Для оценивания качества процессов управления структурной динамикой БС МКА на этапе применения целесообразно ввести **частные (внутренние)** показатели качества, из которых может быть образован следующий вектор показателей качества синтеза технологий и программ управления реконфигурацией БС МКА:

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \xi(t), t) = \left\| \mathbf{J}^{(д)г}, \mathbf{J}^{(о)г}, \mathbf{J}^{(к)г}, \mathbf{J}^{(р)г}, \mathbf{J}^{(н)г}, \mathbf{J}^{(е)г}, \mathbf{J}^{(с)г}, \mathbf{J}^{(в)г} \right\|^T, \quad (13)$$

где $\mathbf{J}^{(д)г}, \mathbf{J}^{(о)г}, \mathbf{J}^{(к)г}, \mathbf{J}^{(р)г}, \mathbf{J}^{(н)г}, \mathbf{J}^{(е)г}, \mathbf{J}^{(с)г}, \mathbf{J}^{(в)г}$ – соответственно векторы показателей качества управления движением, операциями взаимодействия, каналами, ресурсами, потоками, параметрами операций, структурами, вспомогательными операциями в БС МКА и НКУ.

В работах [4,5,7,8] разработан подход к вычислению значений обобщенных показателей *структурно-функциональной живучести* БС МКА в виде нечетких треугольных чисел, в основе которого положен анализ оптимистических, пессимистических или случайных (произвольных) траекторий структурно-функциональной реконфигурации объекта, вызванных отказами (восстановлением) БС МКА. Для определения значений показателей *структурно-технологической живучести* БС МКА была использована методика, подразумевающая описание вариантов участия ЭП БС МКА в технологических циклах управления объектом в виде гиперграфов, проведения операции их дифференцирования и вычисления структурно-топологических показателей нечеткого графа (производной) технологической независимости БС МКА [8,31].

Проведенный анализ показывает, что показатели живучести МКА могут принимать четкие, интервальные, нечеткие значения и, в самом общем случае, могут быть представлены как лингвистические переменные. В этом случае задача анализа и оценивания показателей живучести конфигурации БС МКА относится к задачам многокритериального оценивания с лингвистическими переменными. Для разрешения критериальной неопределенности в указанной ситуации разработана новая методика построения и оптимизации обобщенного показателя

живучести конфигурации БС МКА [8, 31]. Суть предлагаемой методики состоит в совместном использовании идей вербального анализа решений (простые и сложные опорные ситуации опроса) и процедур сведения качественных показателей к количественным, основанных на применении математического аппарата теории нечетких множеств, отношений, мер и теории планирования эксперимента.

На основе вышеизложенного формально проблема синтеза технологий и программ управления реконfigurацией БС МКА с использованием или без использования средств может быть описана следующим образом.

Дано: (7)-(9), (10), (11), (12), (13), $t \in (T_0, T_f]$.

Для заданной ситуационно складывающейся обстановки необходимо найти: $\mathbf{u}_{\text{пр}}(t)$, $\mathbf{v}(\mathbf{x}(t), t)$, β , при которых выполняются ограничения (7)-(9), (10), (11), (12), а обобщенный показатель качества $J_{\text{об}} = J_{\text{об}}(\mathbf{J}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}_{\text{пр}}(t), \mathbf{v}(\mathbf{x}(t), t), \xi(t)))$ принимает оптимальное (минимальное) значение. Предполагается, что все частные показатели качества управления реконfigurацией БС МКА также необходимо минимизировать. К указанным показателям относятся, например, коэффициент снижения эффективности целевого применения МКА, вызванной реконfigurацией его БС, показатели затрат ресурсов, длительности времени на проведения реконfigurации, показатель объема невыполненных технологических операций и т.п.).

Предложенное новое системно-кибернетическое описание проблемы синтеза технологий и программ управления реконfigurацией БС МКА (которое традиционно представляется в дискретно-событийной форме [1-2,9-19]) позволило привлечь для ее конструктивного решения математический аппарат прикладной теории проактивного управления структурной динамикой сложных технических объектов, разработанный авторами статьи и представленной в работах [3-5,24,31].

4. Методологические и методические основы решения исследуемой проблемы. При разработке общей методологии решения задач синтеза технологий и программ управления реконfigurацией БС МКА предлагается базироваться на трех основополагающих концепциях проведения современных системно-кибернетических исследований, а именно- *концепциях комплексного моделирования, проактивного и интеллектуального управления* рассматриваемыми космическими средствами [4,6,7,25]. Место данных концепций в общей структуре методологических и методических основ, разработанных к настоящему времени авторами статьи, показано на рисунке 1.

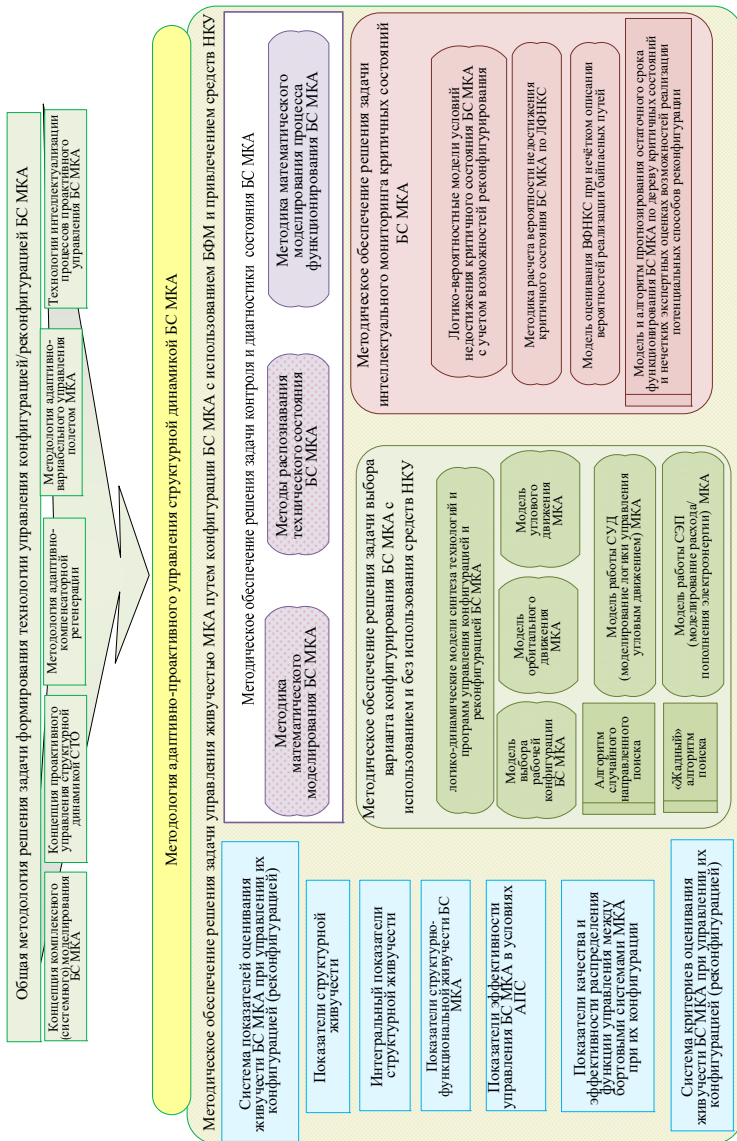


Рис. 1. Разработанный научно-методический аппарат решения проблемы синтеза технологий и программ управления БС МКА для повышения их живучести

На рисунке 1 приняты следующие сокращения- БФМ-бортовой функциональный модуль, ЛФНКС-логическая функция недостижения критичного состояния, ВФНКС- вероятностная функция недостижения критичного состояния, СЭП-система энергопитания, СУД- система управления движением.

Для того, чтобы описать содержание разработанного методического обеспечения решения рассматриваемой проблемы целесообразно задать некоторый наиболее общий сценарий, в рамках которого может быть продемонстрирована работоспособность разработанного специального модельно-алгоритмического обеспечения. Пусть у нас есть орбитальная группировка (ОГ) МКА, решающих на плановой основе задачи обзорного наблюдения за заданной совокупностью объектов (Обо).

Будем рассматривать некоторый МКА (в общем случае входящий в ОГ МКА), имеющий свою собственную программу полета (ПП), в рамках которой им выполняется плановый объем работ, реализуемый на борту МКА за счет согласованного функционирования бортовых обеспечивающих систем (таких, например, как система управления движением (СУД), система терморегулирования (СТР), система энергопитания (СЭП)) и модуля полезной нагрузки (МПН), или, по-другому, модуля целевой аппаратуры. Предполагается, что у каждой БС МКА имеется свой аппаратно-программный резерв (структурный, информационный, временной), также заранее сформирован функциональный резерв в виде возможных обходных путей (байпасов, контуров управления). Кроме того, имеется иерархический набор алгоритмов реконфигурации и конфигурации БС МКА, а также технологий их использования. Имеется также НКУ МКА, который рассматривается как дополнительный контур управления БС МКА для обеспечения его живучести. Пусть в некоторый заранее не заданный момент времени происходит аварийная полетная ситуация (АПС). Она может быть расчетной и нерасчетной.

Остановимся в начале на **I ветви обобщенной процедуры выхода из расчетной АПС** (расчетной нештатной ситуации) и на соответствующих последовательно выполняемых шагах реализации данной процедуры.

Шаг 1.1. Моделирование процессов контроля, оценивания и диагностики состояния БС МКА. В соответствии с заранее введенным сценариям появления АПС, определяется факт появления расчетной нештатной ситуации, а также определяется (моделируется в обратном времени) длительность нахождения БС МКА в скрытом состоянии (в состоянии АПС).

Шаг 1.2. Происходит расчет времени перехода БС (или ее прибора) в невозвратное состояние (о расчете данного времени можно прочитать в отчете [8]) и сравнение его с текущим временем, а также расчет времени на выключение отказавшего прибора, анализ наличия

резервного прибора в БС (если нет резервного прибора, то переход на Шаг 1.4), времени на подготовку и конфигурирование резервного прибора. Если указанное время (выключение прибора и анализ наличия резерва) превышает время на переход в невозвратное состояние, то уход на Шаг 1.3. Если времени на переход на резервный прибор нет, то переход на Шаг 1.3. Если времени достаточно, то включается алгоритм восстановления работоспособности БС МКА и осуществляется возврат на плановую траекторию функционирования МКА (переход на Шаг 1.6).

Шаг 1.3. Включается алгоритм перевода МКА в режимы «Дежурный ориентированный полет (ОП)», либо «Неориентированный полет (НП)», с борта МКА подается сигнал «Вызов НКУ», после чего осуществляется переход в режим централизованного управления МКА из центра управления полетом (ЦУП) данным МКА.

Шаг 1.4. На данном шаге формируются и реализуются программы реконфигурации БС МКА. При этом в начале осуществляется проверка наличия соответствующего времени на проведение стандартных реконфигураций, либо разработку (синтез) и реализацию новых программ реконфигурации.

На рисунке 2 приведена обобщенная схема ситуационного выбора алгоритма реконфигурации БС МКА для существующей и используемой на практике технологии эвристической реконфигурации, которая на данном рисунке названа “стандартной” реконфигурацией, и предлагаемой структурно-функциональной реконфигурации (СФР), базирующейся на разработанном новом научно-методическом аппарате, о котором речь идет в данной статье.

Из анализа содержания данного рисунка видно, что каждой АПС и каждому текущему состоянию БС МКА, а также каждой программе полета на каждом конкретном этапе полета можно поставить свою программу выхода (технологии и программы реконфигурации) из расчетной и нерасчетной АПС.

При выборе конкретной последовательности операций, связанных с выключением отказавшего прибора, поиском нового прибора, его включением, проведением конкретных действий по восстановлению работоспособности соответствующей БС, главным параметром, определяющим какую технологию и какой соответствующей ей алгоритм нужно использовать для выполнения выбранной программы реконфигурации, является параметр, характеризующий общее время на расчет и реализацию указанной программы (см. таблицу 1). В данной таблице этот параметр обозначен как t_i .

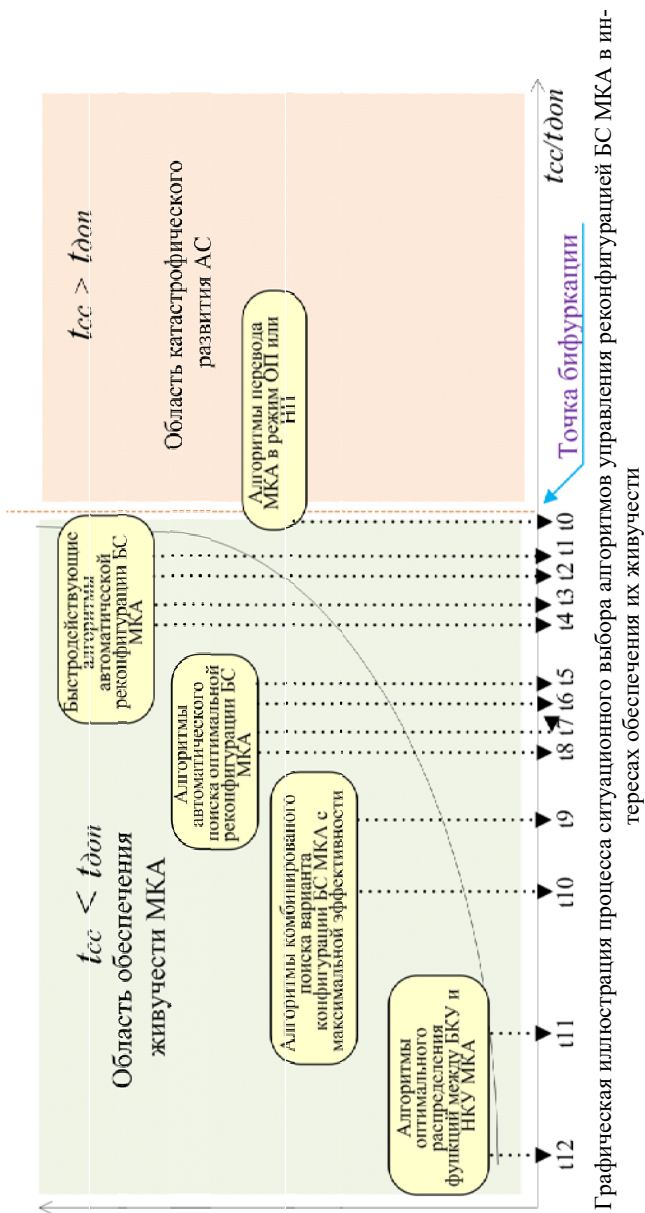



Рис. 2. Графическая иллюстрация процесса ситуационного выбора алгоритмов управления реконфигурацией БС МКА в ин-терсах обеспечения их живучести

Таблица 1. Сведения о характеристиках разработанных алгоритмов реконфигурации БС МКА

Критичность возникновения АПС	Время на «стандартную» реконфигурацию	Время на структурно-функциональную реконфигурацию	
	Усложнение модели и алгоритма <div style="text-align: center;">  </div>		
	Реконфигурация без оптимизации	Реконфигурация с оптимизацией	
Без прерывания операции	t_1	t_5	t_9
Без прерывания режима	t_2	t_6	t_{10}
Без снижения работоспособности БС МКА	t_3	t_7	t_{11}
Без перехода в НП	t_4	t_8	t_{12}
<i>Примечание:</i> 1. t_i – время на проведение реконфигурации БС МКА при заданной критичности возникновения АПС и требуемом алгоритме реконфигурации; 2. $t_i \leq t_{i+1}$; 3. t_{cc} – время выявления скрытого состояния; 4. t_0 – время перехода в режим ОП или НП			

В правой части данной таблицы, где речь идет о временах, затрачиваемых на структурно-функциональную реконфигурацию, введены два столбца. В левом столбце представлены времена на проведении структурно-функциональной реконфигурации с однокритериальной оптимизацией, в правом столбце речь идет о временах, полученных в результате решения задач многокритериальной структурно-функциональной реконфигурации.

Сравнивая данное время с прогнозируемым временем возможного попадания в невозвратное состояние (в точку бифуркации), можно найти наиболее предпочтительные в складывающейся обстановке технологию и реализующей ее алгоритм реконфигурации.

В рамках исследований, выполненных к настоящему моменту времени авторами статьи, предложены, реализованы (в виде соответствующих программных комплексов) и проанализированы следующие методы и алгоритмы реконфигурации БС МКА в зависимости от критичности прерываемых операций, режимов и имеющегося временного ресурса на проведение реконфигурации [4-8,10].

1) Методы и алгоритмы реконфигурации, выполняющие парирование АПС, без прерывания выполнения текущей операции:

- «стандартная» реконфигурация, использующая структурный резерв, то есть замену отказавшей БА на аналогичную (резервную) аппаратуру;

- структурно-функциональная реконфигурация (СФР), при которой кроме структурного используется также и функциональный резерв. Может проводиться в целях оптимизации расхода бортового ресурса и/или с учётом ограничений на его потребление. Задача выбора рабочей конфигурации производится на основе «жадного» алгоритма или алгоритма случайного направленного поиска.

2) Методы и алгоритмы реконфигурации, выполняющие парирование АПС, с прерыванием выполнения текущей операции в рамках реализуемого режима работы БС или режима функционирования МКА:

- «стандартная» реконфигурация;
- СФР: «жадный» алгоритм или алгоритм случайного направленного поиска.

3) Методы и алгоритмы реконфигурации, выполняющие парирование АПС, со сменой реализуемого режима работы БС или режима функционирования МКА, но без снижения уровня работоспособности:

- «стандартная» реконфигурация;
- СФР: «жадный» алгоритм или алгоритм случайного направленного поиска.

4) Методы и алгоритмы реконфигурации, выполняющие парирование АПС, со снижением уровня работоспособности, т.е. перевод в дежурные (или в аварийные) режимы:

- «стандартная» реконфигурация;
- СФР: «жадный» алгоритм или алгоритм случайного направленного поиска.

Если нет возможности поддерживать работоспособность МКА или время, отводимое на парирование АПС, крайне мало, то МКА переводится в аварийный режим неориентированного полёта (НП) (переход на Шаг 1.3) с минимальным составом используемой бортовой аппаратуры (БА). Вывод из НП осуществляется с помощью НКУ.

Если известно состояние БС МКА, в которое она попала в результате расчётной АПС и то состояние, в которое ее необходимо перевести (для фиксированной технологии функционирования БС МКА на данном этапе выполнения программы полета (ПП)), то в этом случае комбинированный метод и алгоритм оптимального программного управления БС МКА обеспечивают реконфигурацию оставшихся БС МКА и перевод их в наиболее предпочтительное частично-работоспособное состояние. Далее осуществляется переход на Шаг 1.5.

Шаг 1.5. С использованием моделей, описывающих процессы целевого применения МКА, для выбранной технологии и синтезированной (либо тоже выбранной из заранее рассчитанных) программы реконфигурации БС МКА определяется уровень падения значений показателей целевой эффективности (ЦПЭ) МКА и в целом ОГ МКА, вызванный деградацией БС МКА и ее компенсацией за счет реконфигурации. Если уровень падения значений ЦПЭ является допустимым, то уход на Шаг 1.6 в противоположном случае, повторно уход на Шаг 1.4. Если времени не хватает на повторный расчет программ реконфигурации, то уход на Шаг 1.3.

Шаг 1.6. Восстановление штатных функции БС МКА, перезапуск БС МКА, переход в режим плановой работы по программе полета (ПП).

Схематично алгоритм решения задачи управления конфигурацией (реконфигурации) БС МКА в интересах повышения его живучести при расчётных АПС представлен на рисунке 3.

На данном рисунке приняты следующие сокращения T_0 - длительность нахождения бортовой системы МКА в скрытом аварийном состоянии, T_1 - время перехода БС в невозвратное состояние, T_2 – время выключения отказавшего прибора, T_3 – время конфигурирования резервного прибора, ЦПЭ – показатель внешней эффективности применения МКА (целевой показатель эффективности (ЦПЭ)).

Для расчета ЦПЭ использовались аналитико-имитационные модели в рамках соответствующей имитационной системы. В качестве показателя внешней эффективности применения МКА рассматривались такие показатели как статистическая оценка вероятности слежения за объектом наблюдения; доля площади района, накрываемого полосой обзора МКА в текущем пролете; коэффициент снижения эффективности целевого применения; коэффициент функциональной готовности на сохранение (исключение) исходных номеров пролетов МКА из первичного графика пролетов и ряд других. В основе методики расчета перечисленных показателей лежит имитация функционирования МКА на основе искусственного формирования неопределенности положения и состояния объекта наблюдения посредством моделирования множества объектов или сценариев возможных их маневров в заданной области между пролетами МКА и определения координат и состояния каждого объекта в каждом пролете МКА. При этом в качестве исходных данных наряду пространственно-временными, техническими и технологическими ограничениями задавались синтезированные варианты реконфигурации БС МКА. Подробно результаты проведения соответствующих аналитико-имитационных экспериментов, представлены в работах [8,10].

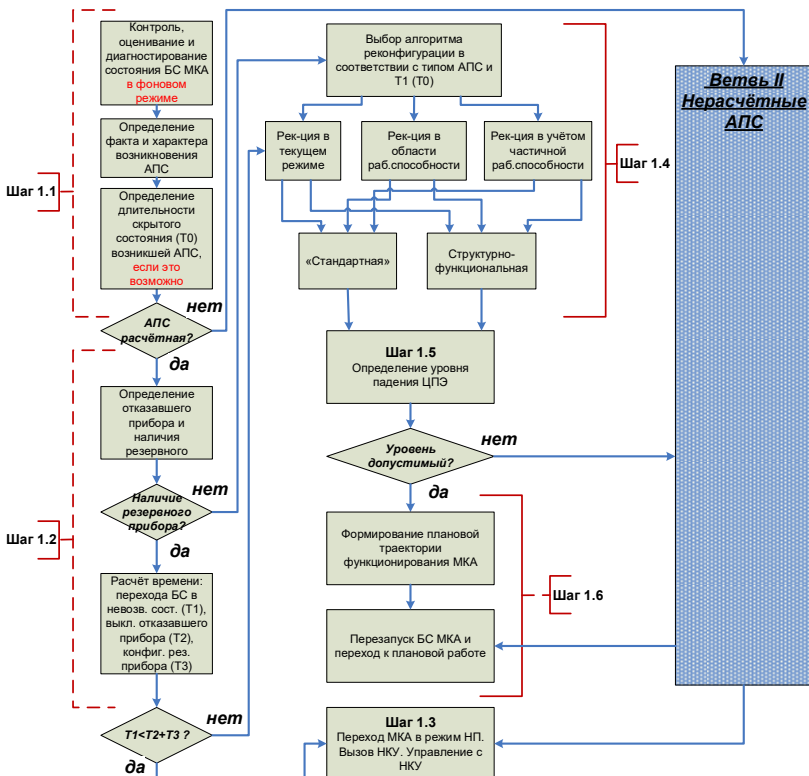


Рис. 3. Алгоритм решения задачи управления реконфигурацией БС МКА при расчётных АПС

Говоря о **II ветви реализации представленной обобщенной процедуры, связанной с выходом БС МКА из нерасчётной АПС**, необходимо, прежде всего отметить следующее. В этом случае, если есть запас соответствующего времени, необходимо на Шаге 1.4. решать не только задачи синтеза и реализации программ конфигурации и реконфигурации БС МКА, но, что важно, задачи многокритериального структурно-функционального синтеза самих технологий конфигурации и реконфигурации БС МКА для обеспечения требуемого уровня их живучести, а также эффективности применения. Данный класс задач на порядок сложнее тех задач, предложения по решению которых рассматривались кем-либо ранее [8].

Пусть при возникновении нерасчетной аварийной полетной ситуации (АПС) соответствующая БС МКА (либо ее подсистема или прибор) попадает в общем случае в нерасчетное частично неработоспособное многоструктурное макросостояние. При этом, как показано [8], в качестве таковых структур рассматриваются функционально взаимосвязанные топологическая, программно-техническая структуры (определяющая какие аппаратно-программные средства, обеспечивают функционирование узлов и связей топологической структуры) и технологическая (функциональная) структура, содержащая многовариантные последовательности выполнения заданной совокупности операций, связанных с БС МКА и определенных в программе полета.

В этом случае для ликвидации нерасчетной АПС требуется, во-первых, найти новое работоспособное многоструктурное макросостояние БС МКА (либо частично работоспособное состояние, но более высокое по уровню работоспособности чем то, в котором БС оказалась в результате нерасчетной АПС), обеспечивающее требуемый уровень значения показателя эффективности функционирования МКА в складывающейся обстановке и, во-вторых, требуется синтезировать такие программы управления структурной динамикой (программы управления конфигурацией (если хватает ресурсов), либо реконфигурацией (если не хватает ресурсов)) БС МКА, обеспечивающие наилучший (оптимальный) перевод БС МКА из заданного в найденное многоструктурное макросостояние.

Если времени и бортовых вычислительных ресурсов на расчет и реализацию соответствующих состояний и программ недостаточно (см. рис. 4), то осуществляется перевод МКА в следующие режимы: «Дежурный ориентированный полет», либо «Неориентированный полет». В этом случае с борта МКА подается сигнал «Вызов НКУ». После чего осуществляется переход в режим централизованного управления МКА из ЦУП (уход на Шаг 1.3).

Основное достоинство разработанного метода синтеза оптимальной технологии и программы реконфигурации БС МКА (или, по-другому, программ управления структурной динамикой БС МКА) заключается в том, что в результате синтеза вектора $\mathbf{u}_{\text{пр}}(t)$ (комплексного плана реконфигурации БС МКА) в момент времени $t = T_f$ (в момент завершения очередного суточного цикла управления БС МКА) мы, наряду с оптимальным планом реконфигурации БС МКА, одновременно получаем новую технологию управления реконфигурацией БС МКА, а также то искомое работоспособное (частично работоспособное) многоструктурное макросостояние $\mathbf{x}(T_f) \in X_f(\beta)$, находясь в котором БС МКА сможет

выполнять поставленные перед ней задачи в динамически изменяющейся (прогнозируемой) обстановке с требуемой степенью устойчивости (робастности).

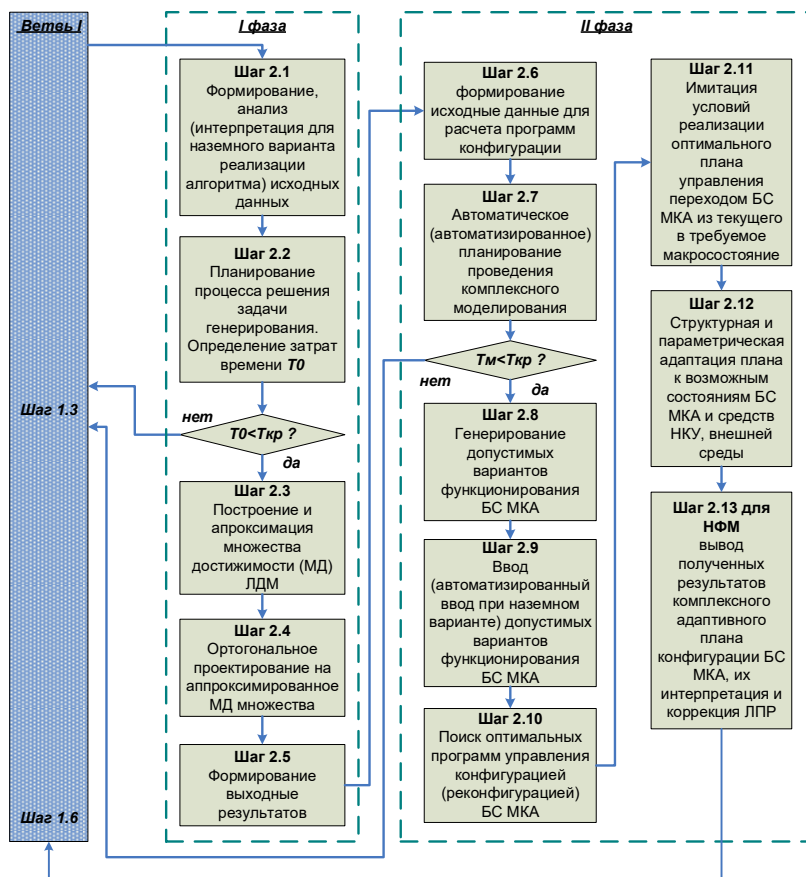


Рис. 4. Алгоритм решения задачи управления конфигурацией (реконфигурации) БС МКА при парировании нерасчётной АПС

Схематично алгоритм решения задачи управления конфигурацией (реконфигурации) БС МКА в интересах повышения его живучести при нерасчётных АПС представлен на рисунке 4. На рисунке 4 приняты следующие сокращения – ЛДМ-логико-динамическая модель, МД – множество достижимости, ЛПП- лицо, принимающее решение. К

настоящему времени разработанные методологические и методические основы решения рассматриваемой проблемы были практически реализованы при выполнении ряда научно-исследовательских работ в ракетно-космической и промышленно-производственной сферах [8, 26-28].

5. Пример решения задачи. Постановка задачи синтеза технологий и программ управления конфигурацией и реконфигурацией (если не хватает ресурсов) БС МКА состоит в следующем. В качестве исходных данных предполагается известными пространственно-временные, технические и технологические ограничения, связанные с решением задач управления МКА ДЗЗ, а также технологическая, топологическая и функциональные структуры бортового комплекса управления (БКУ) и НКУ МКА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). На рисунке 5 приведены варианты графического задания технологии сбора, обработки информации и формирования управляющих воздействий в АСУ МКА ДЗЗ. На данном рисунке каждому блоку соответствует своя функция обработки информации и управления, а также соответствующий программный модуль.

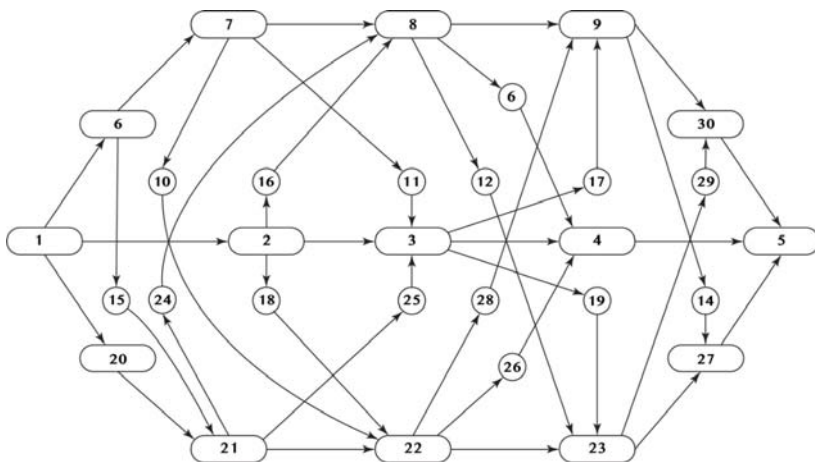


Рис. 5. Граф обобщенной технологии сбора, обработки данных и формирования управляющих воздействий в АСУ МКА ДЗЗ

На рисунке 5 приняты следующие условные обозначения: 1 – сбор данных, осуществляемый с помощью специальной бортовой аппаратуры МКА; 2, 7, 21 – первичная обработка полученных данных на радиотехнических станциях (РТС) командно-измерительного комплекса (КИК), на борту МКА, в центре управления полетом МКА (ЦУП МКА; 3, 8, 22 –

основная (вторичная) обработка данных на РТС КИК, МКА, ЦУП МКА; 4, 9, 23 – формирование управляющих воздействий (программ управления) для бортовых систем (БС МКА); 6 – передача данных на радиотехнические станции РТС КИК; 10, 12, 14, 15 – передача информации с РТС КИК в центр управления полетом (ЦУП) МКА; 11, 13 – передача данных с РТС КИК на МКА; 16, 17 – передача данных с МКА на РТС КИК; 18, 19 – передача данных с МКА в ЦУП МКА; 20 – передача данных с МКА в ЦУП МКА; 24 – передача данных и ЦУП МКА на РТС КИК; 25, 26 – передача данных и ЦУП МКА на МКА; 27 – передача информации из ЦУП МКА на МКА; 28, 29 – передача информации из ЦУП МКА на РТС КИК; 30 – передача информации из РТС КИК на МКА; 5 – завершающая операция, состоящая в реализации сформированной программы управления бортовыми системами МКА. Операции 7, 8, 9 выполняются в КИК на вычислительных средствах РТС, 2, 3, 4 – операции выполняются на борту МКА, 21,22,23 – операции выполняются на вычислительных средствах ЦУП МКА.

Формулировка решаемой задачи: необходимо найти оптимальный вариант распределения функций обработки получаемых данных и управления (с точки зрения показателей затрат ресурсов и времени на проведение реконфигурации БС МКА), а также соответствующих программных модулей в АСУ МКА ДЗЗ в зависимости от текущего состояния БС МКА, а также от текущего потока данных, поступающих в рассматриваемую АСУ. Другими словами, в данном случае должна быть решена, во-первых, задача многокритериального структурно-функционального синтеза технологии обработки получаемых данных и управления основными элементами и подсистемами АСУ МКА ДЗЗ, и, во-вторых, должен быть построен конкретный план работы бортовых систем МКА и средств НКУ МКА, реализующий данную технологию. Более подробная информация о составе и структуре исходных данных, необходимых для решения подобного рода задач, представлена в работах [8,29,30]. В работах авторов данной статьи показано [4,8,24] как с помощью разработанного полимодельного комплекса удалось свести перечисленные прикладные задачи к задаче оптимального программного управления сложным динамическим объектом (АСУ МКА ДЗЗ), а ее, в свою очередь, к двухточечной краевой задаче.

В таблице 2 приведены результаты машинных экспериментов с разработанным комплексом программ для двух сценариев распределения функций управления и программных модулей в АСУ МКА ДЗЗ. Планирование реконфигурации БС МКА и синтез соответствующей технологии управления реконфигурации проводится для интервала времени, равном 1440 минут (1 сутки).

В рамках первого сценария синтезировалась программа конфигурирования программных модулей и соответствующих операций технологического цикла управления (ТЦУ) МКА, для 30 программных модулей. Для второго сценария рассматривались два МКА ДЗЗ (общее число программных модулей, которые должны быть распределены, равнялось 60). Показателями качества программного управления были показатель затрат времени на сбор, обработку, анализ информации и формирование управляющих воздействий, а также показатель затрат ресурсов (энергетики) при реализации соответствующих планов распределения функций (программных модулей).

Таблица 2. Результаты планирования реконфигурации БС МКА

По-казатель	Программные модули																														Итого
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
Сценарий 1	Алгоритм: FIFO																														
	Время	2			2			2													1	4	4					2	5	22	
	Энергия	20			20			30												30	120	120					60	75	475		
	Алгоритм: Оптимизация																														
	Время	2	4	4	2	4	4			3																					23
	Энергия	20	40	40	20	40	60			45																					265
Сценарий 2	Алгоритм: FIFO																														
	Время	4	8		4	8	8			6									12			8				8				66	
	Энергия	40	80		40	80	120			90									120			240				240				1050	
	Алгоритм: Оптимизация																														
	Время	4	5		4	4			6	2			4			4				1	4					3				5	46
	Энергия	40	50		40	40			90	30			60			40				30	120				90					75	705

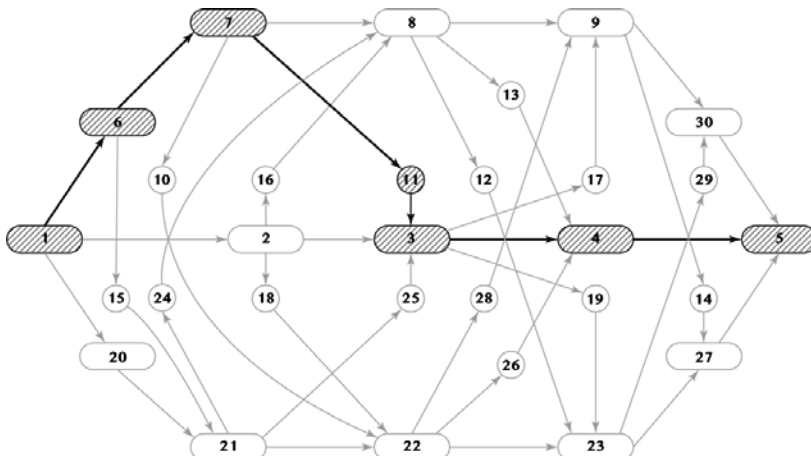


Рис. 7. Результаты оптимального синтеза технологий конфигурирования программных модулей в рамках первого сценария

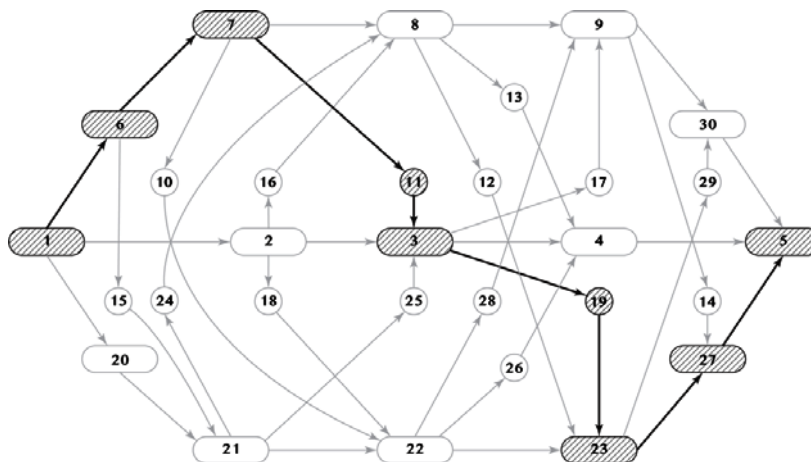


Рис. 8. Результаты эвристического синтеза технологий конфигурирования программных модулей в рамках второго сценария

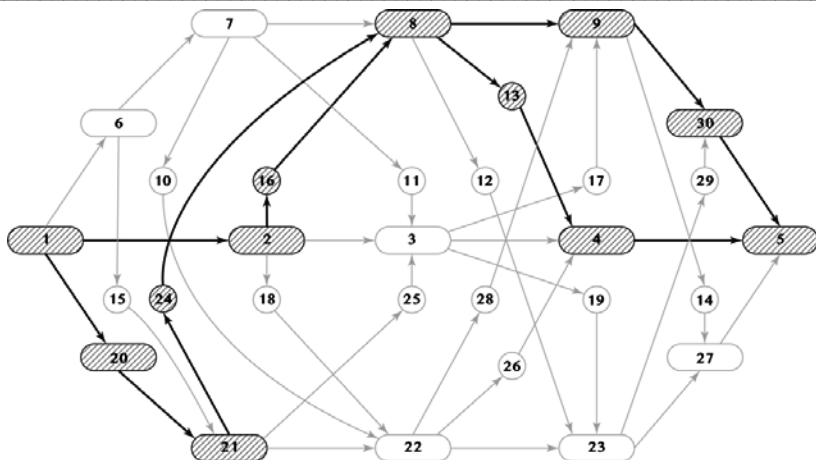


Рис. 9. Результаты оптимального синтеза технологий конфигурирования программных модулей в рамках второго сценария

6. Заключение. В целом, подводя итог вышеизложенному материалу, можно сказать, что в результате выполненных исследований был разработан новый научно-методический аппарат (см. рис. 1) эффективного решения задач одновременного (параллельного) многокритериального синтеза как технологий, так и программ управления конфигурацией и реконфигурацией БС МКА в интересах повышения их живучести. При этом каждая конкретная синтезированная технология управления представляет собой новую ситуационно выбираемую последовательность выполнения операций и распределения ресурсов МКА с использованием и без использования средств НКУ, обеспечивающую эффективное парирование расчетных и нерасчетных аварийных полетных ситуаций (АПС) и оперативное восстановление работоспособности его БС. Для подтверждения эффективности синтезированной технологии управления был разработан взаимосвязанный программный комплекс, включающий в себя экспериментальные образцы бортового и наземного функционального модулей синтеза технологий и программ управления реконфигурации БС МКА.

В отличие от существующей технологии управления реконфигурацией БС МКА, сводящейся к простому переключению отказавшего прибора на резервный комплект, в рамках предлагаемой новой технологии управления в ходе ее реализации происходит учет и анализ текущих характеристик задач, решаемых в БС МКА, анализ состояния ресурсов БС и выполняемых ими функций, анализ и оценивание текущего состо-

нения БС МКА в целом, оперативный расчет, анализ и оптимизация целевых и информационно-технологических возможностей и ресурсов БС МКА, для обоснованного распределения, либо перераспределения функций обработки информации и управления МКА между его элементами и подсистемами, а также средствами НКУ.

Таким образом синтезируемые с помощью предлагаемого нового научно-методического аппарата технологии управления реконфигурацией БС МКА следует рассматривать не только как технологии управления структурами БС МКА для компенсации отказов, но и как технологии управления, направленные на повышение эффективности функционирования БС МКА в динамически изменяющейся обстановке.

Литература

1. *Ахметов Р.Н., Макаров В.П., Соллогуб А.В.* Байпасность как атрибут живучести автоматических космических аппаратов в аномальных полётных ситуациях // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2015. № 4(44). С. 17–37.
2. *Кирилин А.Н., Ахметов Р.П., Макаров В.П., Соллогуб А.В.* Методы обеспечения живучести низкоорбитальных автоматических КА зондирования Земли: математические модели, компьютерные технологии // М.: Машиностроение, 2010. 384 с.
3. *Калинин В.Н.* Современная космическая кибернетика – методологические основы и направления исследований // Информация и космос. 2007. № 3. С. 7–16.
4. *Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов // М.: Наука. 2006. 410 с.
5. *Павлов А.Н., Кулаков А.Ю., Потрясаев С.А., Соколов Б.В.* Методы, алгоритмы и технологии реконфигурации бортовых систем маломассогабаритных космических аппаратов // Известия Вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61. № 7. С. 596–603.
6. *Kalinin V.N., Sokolov B.V.* Multiple-model description of control processes for airspace crafts // Journal Computer System Science International. 1996. no.6. pp. 192–199.
7. *Kalinin V.N., Sokolov B.V.* Optimal planning of the process of interaction of moving operating objects // Int. J. Differ. Equ. 1985. vol. 21. pp. 502–506.
8. Научно-технический отчет (промежуточный) по теме “Разработка технологии и создание экспериментальных программных комплексов управления конфигурацией бортовых систем маломассогабаритных КА в интересах повышения их живучести” (шифр “Технология-СГ-3.3.3.1”). СПИИРАН. 2018. 450 с.
9. *Ковтун В.С.* Применение методик варибельного управления полётом автоматических космических аппаратов для рационального использования ресурсов бортовых систем // Космонавтика и ракетостроение. 2017. № 4(97). С. 143–157.
10. *Ковтун В.С., Почукаев В.Н.* Методы образно-символического управления автоматическими космическими аппаратами в условиях аномальных ситуаций // Космонавтика и ракетостроение. 2017. № 6(99). С. 1–14.
11. *Mikaelyan L., Müller S., Gerndt A., Noll T.* Synthesizing and Optimizing FDIR Recovery Strategies from Fault Trees // Formal Techniques for Safety-Critical Systems. FTSCS 2018. pp. 37–54.
12. *Tipaldi M., Glielmo L.* A Survey on Model-Based Mission Planning and Execution for Autonomous Spacecraft // IEEE Systems Journal. 2018. vol. 12. no. 4. pp. 3893–3905.

13. *Lianxiang J., Peipei X., Xuyang F.* Software Reconfiguration Technology for Serviceable Satellite OBDH System // Proceedings of the Second International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering (ICMCCE). 2017. pp. 100–104.
14. *Amigoni F. et al.* Aggregating Models for Anomaly Detection in Space Systems: Results from the FCTMAS Study // International Conference on Intelligent Autonomous Systems. 2018. pp. 142–160.
15. *Wang D.-Y. et al.* Connotation and Research of Reconfigurability for Spacecraft Control Systems: A Review // Acta Automatica Sinica. 2017. vol. 43(10). pp. 1687–1702.
16. *Mehdi J.* Optimal redundant sensor configuration for accuracy increasing in space inertial navigation system // Aerospace Science and Technology. 2015. vol. 47. pp. 467–472.
17. *Nayak A., Reyes L.R., Lee S., Nof S.Y.* Resource sharing in cyber-physical systems: modelling framework and case studies // International Journal of Production Research. 2016. vol. 54(23). pp. 6969–6983.
18. *Theorin A. et al.* An event-driven manufacturing information system architecture for Industry 4.0 // International Journal of Production Research. 2016. pp. 1297–1311.
19. *Oesterreich T.D., Teuteberg F.* Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry // Computers in Industry. 2016. vol. 83. pp. 121–139.
20. *Božek A., Wysocki M.* Flexible Job Shop with Continuous Material Flow // Int. J. Prod. Res. 2015. 53. pp. 1273–1290.
21. *Pinha D., Ahluwalia R., Carvalho A.* Parallel Mode Schedule Generation Scheme // Parallel mode schedule generation scheme // IFAC-PapersOnLine. 2015. vol. 48. no. 3. pp. 794–799.
22. *Battaia O., Dolgui A., Guschinsky N.* Decision support for design of reconfigurable rotary machining systems for family part production // International Journal of Production Research. 2017. vol. 55(5). pp. 1368–1385.
23. *Blazewicz J., Pesch E., Trystam D., Zhang G.* New Perspectives in Scheduling Theory // Journal of Scheduling. 2015. vol. 18. pp. 333–334.
24. *Kalinin V.N., Sokolov B.V.* A dynamic model and an optimal scheduling algorithm for activities with bans of interrupts // Autom. Remote Control. 1987. vol. 48. pp. 88–94.
25. *Васильев С.Н.* От классических задач регулирования к интеллектуному управлению // Теория и системы управления. 2001. № 1. С. 5–22.
26. *Шестопалов М.Ю.* Отказоустойчивое управление циклическими многостадийными технологическими процессами // Инновации. 2015. № 4(198). С. 8–12.
27. *Шестопалов М.Ю., Имаев Д.Х.* Отказоустойчивое управление сложными системами // Дистанционные образовательные технологии: Материалы III Всероссийской научно-практической конференции. 2018. С. 259–266.
28. *Шестопалов М.Ю., Имаев Д.Х., Кораблев Ю.А., Квашиин С.В.* Проектирование систем управления территориально распределенными объектами // Инновации. 2018. № 10(240). С. 100–107.
29. *Дзюбановский С.А., Озерянный Н.А.* Системы автоматического управления с реконфигурацией // Измерение, контроль, автоматизация. 1990. № 4(76). С. 62–80.
30. *Цвиркун А.Д.* Основы синтеза структуры сложных систем // М.: Наука. 1982. 200 с.
31. *Pavlov A.N.* The Technique of Multi-Criteria Decision-Making in the Study of Semi-Structured Problems // Proceedings of the 6th Computer Science On-line Conference 2017 (CSOC2017). pp. 131–140.
32. *Калинов М.И., Родионов В.А., Черкашин В.Г.* Влияние крена космического аппарата на эффективность решения задачи наблюдения за морскими объектами // Информатизация и связь. 2020. № 5. С. 151–157.

Калинин Владимир Николаевич — д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ, профессор, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского. Область научных интересов: теория системных исследований, космическая кибернетика и информатика, теория оптимального управления динамическими системами, автоматизированные системы управления, подготовка инженерных кадров и новые информационно-дидактические технологии в высшем образовании. Число научных публикаций — 200. kvn.112@mail.ru; ул. Ждановская, 13, 197198, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)3479508; факс: +7(812)3284450.

Кулаков Александр Юрьевич — канд. техн. наук, старший научный сотрудник, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН). Область научных интересов: разработка научных основ теории управления структурной динамикой сложных организационно-технических систем. Число научных публикаций — 30. russ69@bk.ru; 14 линия В.О., 39, 199178, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)3280103; факс: +7(812)3284450.

Павлов Александр Николаевич — д-р техн. наук, профессор, Почетный работник сферы образования РФ, старший научный сотрудник, Лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН); Профессор, Военно-космическая академия им. А.Ф.Можайского. Область научных интересов: разработка научных основ теории управления структурной динамикой сложных организационно-технических систем. Число научных публикаций — 200. pavlov62@list.ru; 14 линия В.О., 39, 199178, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)3280103; факс: +7(812)3284450.

Потрясаев Семен Алексеевич — д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник, Лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН). Область научных интересов: системный анализ и исследование операций, теория управления структурной динамикой сложных организационно-технических систем. Число научных публикаций — 140. spotryasaev@gmail.com; 14 линия В.О., 39, 199178, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)3280103; факс: +7(812)3284450.

Соколов Борис Владимирович — д-р техн. наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, главный научный сотрудник, Лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН). Область научных интересов: разработка научных основ теории управления структурной динамикой сложных организационно-технических систем. Число научных публикаций — 600. sokol@iias.spb.su; 14 линия В.О., 39, 199178, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)3280103; факс: +7(812)3284450.

Поддержка исследований. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 19-08-00989-а, № 20-08-01046), в рамках бюджетной темы № 0073–2019–0004.

V. Kalinin, A. Kulakov, A. Pavlov, S. Potryasaev, B. Sokolov
**METHODS AND ALGORITHMS FOR THE SYNTHESIS OF
TECHNOLOGIES AND PROGRAMS FOR CONTROLLING THE
RECONFIGURATION OF ON-BOARD SYSTEMS OF SMALL-
SIZED SPACECRAFTS**

Kalinin V., Kulakov A., Pavlov A., Potryasaev S., Sokolov B. **Methods and Algorithms for the Synthesis of Technologies and Programs for Controlling the Reconfiguration of On-Board Systems of Small-Sized Spacecrafts.**

Abstract. In modern conditions, in the field of the creation and use of existing and advanced space vehicles (SV), the issues of autonomy and survivability acquire particular relevance in the development and operation of small-mass spacecraft (SMS) for Earth remote sensing (ERS).

The specificity of the small spacecraft lies in the fact that it is difficult to directly apply to the process of their creation the standard practice of using the system for ensuring the reliability of the rocket and space industry due to the lack of the ability to provide full structural redundancy of its onboard systems (OBS) associated with mass-dimensional and other restrictions. In this case, the tasks of developing model-algorithmic methods and approaches to ensuring the required level of indicators of structural reliability, survivability and, in general, the effectiveness of the functioning of the MCA OBS become of particular relevance.

The problem of increasing the level of indicators of autonomy, survivability, efficiency of functioning of complex technical objects (CTO), which, in particular, SMS belong, is considered in the scientific literature in conjunction with solving problems of control, assessment and technical diagnostics of the state of the CTO reconfiguration (structural, functional, structural-functional reconfiguration) of CTO structures, management of its reserves, alternative and multi-mode control, analysis of fault tolerance and disaster recovery of CTO. However, all of these studies are fragmented, both at the methodological and methodological and technological levels.

The article provides a generalized description of the combined methods and algorithms developed by the authors for solving the problems of synthesis of technologies and programs for controlling the OS reconfiguration to increase the survivability of the SMS. At the same time, these tasks are solved not in isolation, but in a comprehensive manner within the framework of the general problem of proactive management of the structural dynamics of SMS with or without the use of GCC tools, which ensures the efficiency, validity, completeness, isolation and consistency of synthesized management decisions. The novelty of the approach proposed in the article is that its authors, based on the concepts of integrated (system) modeling, proactive control of the structural dynamics of the OS SMS, as well as the intellectualization of the processes of proactive control of the OS SMS, developed methods and algorithms for the synthesis of technologies and programs. Control of the reconfiguration of the MCS BS, providing, firstly, the situational choice of the optimal sequence of operations and the allocation of SMS resources with and without the use of GCC facilities, and, secondly, effective parrying not only of the calculated ones, but also off-design emergency flight situations (EFS), as well as the operational restoration of the operability of its OS. The constructiveness of the proposed approach is illustrated by the example of solving the problem of flexible redistribution of information processing tasks between the OS SMS and the SMS GCC.

Keywords: synthesis of control technologies, proactive management of reconfiguration, indicators of survivability and efficiency of functioning of a small-size spacecraft.

Kalinin Vladimir — Ph.D., Dr.Sci., Professor, Honored Scientists of the Russian Federation, Professor, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: development of research

fundamentals for the control theory by structural dynamics of complex organizational technical systems. The number of publications — 200. kvn.112@mail.ru; 13, Zhdanovskaya str., 197198, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)3479508; fax: +7(812)3284450.

Kulakov Aleksandr — Ph.D., Senior Researcher, Laboratory of Information Technologies in Systems Analysis and Modeling, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS). Research interests: development of research fundamentals for the control theory by structural dynamics of complex organizational technical systems. The number of publications — 30. russ69@bk.ru; 39, 14 liniya V.O., 199178, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)3280103; fax: +7(812)3284450.

Pavlov Alexander — Ph.D., Dr.Sci., Professor, Honorary Worker of Education of the Russian Federation, Senior Researcher, Laboratory of Information Technologies in Systems Analysis and Modeling, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS); Prof., Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: development of research fundamentals for the control theory by structural dynamics of complex organizational-technical systems. The number of publications — 200. pavlov62@list.ru; 39, 14 liniya V.O., 199178, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)3280103; fax: +7(812)3284450.

Potryasaev Semen — Ph.D., Dr.Sci., Leading Researcher, Laboratory of Information Technologies in Systems Analysis and Modeling, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS). Research interests: system analysis and operations research, theory of managing the structural dynamics of complex organizational and technical systems. The number of publications — 140. spotryasaev@gmail.com; 39, 14 liniya V.O., 199178, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)3280103; fax: +7(812)3284450.

Sokolov Boris — Ph.D., Dr.Sci., Professor, Honored scientist of Russian Federation, Chief Researcher, Laboratory of Information Technologies in Systems Analysis and Modeling, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS). Research interests: development of research fundamentals for the control theory by structural dynamics of complex organizational-technical systems. The number of publications — 600. sokol@iias.spb.su; 39, 14 liniya V.O., 199178, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)3280103; fax: +7(812)3284450.

Acknowledgements. This research is supported by RFBR (grants No 19–08–00989–a, No 20–08–01046), within the budgetary theme No 0073–2019–0004.

References

1. Ahmetov R.N., Makarov V.P., Sollogub A.V. [Bypass as an attribute of robotic spacecraft survivability in abnormal flight situations]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta – VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2015. vol. 4(44). pp. 17–37. (In Russ.).
2. Kirilin A.N., Ahmetov R.P., Makarov V.P., Sollogub A.V. *Metody obespecheniya zhivuchesti nizkoorbital'nyh avtomaticheskikh KA zondirovaniya Zem-li: matematicheskie modeli, komp'yuternye tekhnologii* [Methods for ensuring the survivability of low-orbit automatic Earth-sensing spacecraft: mathematical models, computer technologies]. M.: Mashinostroenie. 2010. 384 p. (In Russ.).
3. Kalinin V.N. [Modern space cybernetics - methodological foundations and directions of research]. *Informaciya i kosmos – Information and Space*. 2007. vol. 3. pp. 7–16. (In Russ.).

4. Ohtilev M.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M. *Intellektual'nye tekhnologii monitoringa i upravleniya strukturnoj dinamiko slozhnykh tekhnicheskikh ob'ektov* [Intelligent technologies for monitoring and controlling the structural dynamics of complex technical objects]. M.: Science. 2006. 410 p. (In Russ.).
5. Pavlov A.N., Kulakov A.Yu., Potryasaev S.A., Sokolov B.V. [Methods, algorithms and technologies for reconfiguring onboard systems of small-size spacecraft]. *Izvestiya Vuzov. Priborostroenie – Journal of Instrument Engineering*. 2018. Issue 61. vol. 7. pp. 596–603. (In Russ.).
6. Kalinin V.N., Sokolov B.V. Multiple-model description of control processes for aerospace crafts. *Journal Computer System Science International*. 1996. vol. 6. pp. 192–199.
7. Kalinin V.N., Sokolov B.V. Optimal planning of the process of interaction of moving operating objects. *Int. J. Differ. Equ.* 1985. vol. 21. pp. 502–506.
8. Nauchno-tekhnicheskij otchet (promezhutochnyj) po teme [Development of technology and creation of experimental software systems for controlling the configuration of onboard systems of small-sized spacecraft in order to improve their survivability] (shifr “Tekhnologiya-SG-3.3.3.1”). SPb: SPIIRAN. 2018. 450 p. (In Russ.).
9. Kovtun V.S. [Application of methods of variable flight control of automatic spacecraft for rational use of onboard systems resources]. *Kosmonavtika i raketostroenie – Astronautics and rocket science*. 2017. vol. 4(97). pp. 143–157. (In Russ.).
10. Kovtun V.S., Pochukaev V.N. [Methods of figurative-symbolic control of automatic spacecraft in anomalous situations]. *Kosmonavtika i raketostroenie – Kosmonavtika i raketostroenie – Astronautics and rocket science*. 2017. vol. 6(99). pp. 1–14. (In Russ.).
11. Mikaelyan L., Müller S., Gerndt A., Noll T. Synthesizing and Optimizing FDIR Recovery Strategies from Fault Trees. *Formal Techniques for Safety-Critical Systems. FTSCS 2018*. pp. 37–54.
12. Tipaldi M., Glielmo L. A Survey on Model-Based Mission Planning and Execution for Autonomous Spacecraft. *IEEE Systems Journal*. 2018. vol. 12. no. 4. pp. 3893–3905.
13. Lianxiang J., Peipei X., Xuyang F. Software Reconfiguration Technology for Serviceable Satellite OBDH System. *Proceedings of the Second International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering (ICMCCE)*. 2017. pp. 100–104.
14. Amigoni F. et al. Aggregating Models for Anomaly Detection in Space Systems: Results from the FCTMAS Study. *International Conference on Intelligent Autonomous Systems*. 2018. pp. 142–160.
15. Wang D.-Y. et al. Connotation and Research of Reconfigurability for Spacecraft Control Systems: A Review. *Acta Automatica Sinica*. 2017. vol. 43(10). pp. 1687–1702.
16. Mehdi J. Optimal redundant sensor configuration for accuracy increasing in space inertial navigation system. *Aerospace Science and Technology*. 2015. vol. 47. pp. 467–472.
17. Nayak A., Reyes L.R., Lee S., Nof S.Y. Resource sharing in cyber-physical systems: modelling framework and case studies. *International Journal of Production Research*. 2016. vol. 54(23). pp. 6969–6983.
18. Theorin A. et al. An event-driven manufacturing information system architecture for Industry 4.0. *International Journal of Production Research*. 2016. pp. 1297–1311.
19. Oesterreich T.D., Teuteberg F. Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry. *Computers in Industry*. 2016. vol. 83. pp. 121–139.
20. Božek A., Wysocki M. Flexible Job Shop with Continuous Material Flow. *Int. J. Prod. Res.* 2015. 53. pp. 1273–1290.
21. Pinha D., Ahluwalia R., Carvalho A. Parallel Mode Schedule Generation Scheme // Parallel mode schedule generation scheme. *IFAC-PapersOnLine*. 2015. vol. 48. no. 3. pp. 794–799.

22. Battaia O., Dolgui A., Guschinsky N. Decision support for design of reconfigurable rotary machining systems for family part production. *International Journal of Production Research*. 2017. vol. 55(5). pp. 1368–1385.
23. Blazewicz J., Pesch E., Trystram D., Zhang G. New Perspectives in Scheduling Theory. *Journal of Scheduling*. 2015. vol. 18. pp. 333–334.
24. Kalinin V.N., Sokolov B.V. A dynamic model and an optimal scheduling algorithm for activities with bans of interrupts. *Autom. Remote Control*. 1987. vol. 48. pp. 88–94.
25. Vasil'ev S.N. [From classical regulation problems to intelligent control]. *Teoriya i sistema upravleniya – Control theory and systems*. 2001. vol. 1. pp. 5–22. (In Russ.).
26. Shestopalov M.YU. [Fault-tolerant control of cyclic multistage technological processes]. *Innovacii – Innovation*. 2015. vol. 4(198). pp. 8–12. (In Russ.).
27. Shestopalov M.YU., Imaev D.H. [Resilient management of complex systems] // *Distancionnye obrazovatel'nye tekhnologii: Materialy III Vseros-sijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii / Otv. Red. V.N. Taran*. 2018. pp. 259–266. (In Russ.).
28. Shestopalov M.Yu., Imaev D.H., Korablev Yu.A., Kvashnin S.V. [Design of control systems for geographically distributed objects]. *Innovacii – Innovation*. 2018. vol. 10(240). pp. 100–107. (In Russ.).
29. Dzyubanovskij S.A., Ozeryannyj N.A. [Automatic control systems with reconfiguration]. *Izmerenie, kontrol', avtomatizaciya – Measurement, control, automation*. 1990. vol. 4(76). pp. 62–80. (In Russ.).
30. Tsvirkun A.D. *Osnovy sinteza struktury slozhnyh sistem* [Fundamentals of the synthesis of the structure of complex systems]. M.: Science. 1982. 200 p. (In Russ.).
31. Pavlov A.N. The Technique of Multi-Criteria Decision-Making in the Study of Semi-Structured Problems. Proceedings of the 6th Computer Science On-line Conference 2017 (CSOC2017). pp. 131–140.
32. Kalinov M.I., Rodionov V.A., Cherkashin V.G. [The influence of the roll of the spacecraft on the efficiency of solving the problem of observing sea objects]. *Informatizaciya i svyaz' – Informatization and communication*. 2020. vol. 5. pp. 151–157. (In Russ.).