

На правах рукописи



Кулаков Александр Юрьевич

**МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМЫ РЕКОНФИГУРАЦИИ СИСТЕМЫ  
УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка  
информации (технические системы)

**АВТОРЕФЕРАТ**

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидат технических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Санкт-Петербургском институте информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН).

Научный руководитель: **Павлов Александр Николаевич**,  
доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры ВКА имени А.Ф.  
Можайского

Официальные оппоненты: **Миронов Юрий Вячеславович**,  
доктор технических наук, доцент,  
Акционерное общество «Научно-  
инженерный центр Санкт-Петербургского  
электротехнического университета»,  
ведущий специалист  
**Струков Александр Владимирович**,  
кандидат технических наук, доцент,  
Акционерное общество  
«Специализированная инжиниринговая  
компания Севзапмонтажавтоматика»,  
ведущий инженер

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Санкт-Петербургский  
государственный университет  
аэрокосмического приборостроения»  
(ГУАП)

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г. в \_\_: \_\_ на заседании  
диссертационного совета Д 002.199.01 при Федеральном государственном  
бюджетном учреждении науки Санкт-Петербургском институте  
информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН) по  
адресу: 199178, Россия, Санкт-Петербург, 14-я линия, д. 39. Факс: (812) 328-  
44-50, тел.: (812) 328-34-11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Санкт-  
Петербургского института информатики и автоматизации Российской  
академии наук [www.spiiras.nw.ru/dissovet/](http://www.spiiras.nw.ru/dissovet/)

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 002.199.01,  
кандидат технических наук

А.А. Зайцева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертационной работы.** Особую важность в настоящее время при разработке и эксплуатации космических аппаратов (КА) приобретают вопросы обеспечения требуемой степени автономности и живучести, а также повышения эффективности функционирования КА в различных условиях обстановки. Актуальность решения указанных задач для КА наблюдения вызвана, с одной стороны, особенностями орбиты на которых функционирует данный тип КА, с другой стороны, отсутствием возможности своевременного управления при возникновении нештатных ситуаций на борту КА.

Для обеспечения автономности и живучести КА необходимо, чтобы КА находился в работоспособном состоянии максимальное время или оперативно восстанавливал свою работоспособность. То есть необходимо иметь возможность изменять (перестраивать) структуру (структуры) КА в различных условиях обстановки с целью поддержания требуемого уровня работоспособности. Широкое распространение на практике при решении задач обеспечения надежности, живучести, катастрофоустойчивости и отказоустойчивости сложных технических систем (СТО) в рамках развиваемой в настоящее время теории управления структурной динамикой получил такой вариант управления структурами СТО как реконфигурация.

В диссертационной работе под процессом изменения структуры КА будем понимать реконфигурацию ключевой бортовой системы космического аппарата – системы управления движением (СУД). Тогда, под реконфигурацией СУД, как видом структурного управления на борту КА, будем понимать последовательность операций, определяющих изменение режимов ориентации КА и состава бортовой аппаратуры (БА), включённой в контур управления (рабочую конфигурацию БА) КА.

Таким образом, решение задачи структурного управления (реконфигурации СУД) КА в целях обеспечения требуемой степени автономности и живучести, а также повышения эффективности функционирования КА является актуальной.

### **Степень разработанности темы.**

Предварительный анализ рассматриваемых подходов к повышению уровня живучести и автономности проектируемых систем с перестраиваемой структурой, а также повышению эффективности их функционирования при помощи реконфигурации структуры объекта, показал, что в рамках применения современных методов управления структурной динамикой к техническим объектам космического назначения эти вопросы, как отдельный предмет научных изысканий, с единой общесистемной точки зрения были недостаточно затронуты и исследованы.

Так в рамках работ Кирилина А.Н., Ахметова Р.Н., Соллогуба А.В., Макарова В.П. подробно рассматривается функционирование КА наблюдения при возникновении аномальных ситуаций (АС), в частности основные принципы построения бортовой системы управления живучестью

КА. Уделено значительное внимание диагностике возникновения АС, методам восстановления штатного функционирования КА. Предложен комплексный инструментарий для технологии полётного реинжиниринга КА наблюдения на основе базы знаний АС с целью обеспечения оперативного управления бортовыми ресурсами. При этом вопросу автоматической реконфигурации бортовых систем вычислительными средствами бортового комплекса управления (БКУ) КА, без участия НКУ, уделяется мало внимания.

Говоря в целом о задачах управления структурно-сложными объектами наиболее значимые результаты в исследовании свойств надёжности, безопасности, живучести объектов, а также в исследовании вопросов структурного управления были получены большим количеством отдельных авторов и авторских коллективов, соответствующих научных школ. Данные авторы выполнили значительный объём научно-исследовательских (НИР) и опытно-конструкторских работ (ОКР), а также написали ряд монографий и учебных пособий, посвящённых вопросам разработки методологических и методических основ исследования свойств структурно-сложных объектов и организации контура структурного управления объектами. Прежде всего, для рассматриваемых в диссертации вопросов важным является упомянуть следующие научные коллективы и отдельных авторов: Половко А.М., Ушакова И.А. (теория надёжности систем), Рябинина И.А. (логико-вероятностное исчисление), Можаяева А.С. (общий логико-вероятностный метод), Соложенцева Е.Д. (логико-вероятностный подход для групп несовместных событий), Волика Б.Г., Буянова Б.Б., Лубкова Н.В. (анализ и синтез структур управляющих систем), Ахметова Р.Н., Макарова В.П., Соллогуба А.В., Кирилина А.Н. (система управления живучестью космических аппаратов дистанционного зондирования Земли), Соколова Б.В., Охтилева М.Ю., Павлова А.Н. (проактивное управление структурной динамикой сложных объектов), Юсупова Р.М. (информационная безопасность), Додонова А.Г. (функциональная и структурная живучесть информационных систем), Тарасова А.А. (функциональная реконфигурация).

Как показывает анализ, при исследовании в указанных направлениях в основном использовались модели оценивания и анализа показателей надёжности, безопасности и живучести СТО. Однако для процесса управления КА, согласно концепции активного подвижного объекта, предложенного профессором Калининым В.Н., характерно его деление на четыре вида: управление бортовыми ресурсами, управление взаимодействием, управление бортовой аппаратурой (средствами) и управление движением. При этом процессы управления взаимозависимы и обусловлены текущим состоянием объекта. Особо стоит отметить влияние процесса структурного управления на другие виды управления, в частности на управление движением (координатно-параметрическое управление).

Поэтому применительно к СУД КА реконфигурацию следует рассматривать не только как технологию управления структурой КА для

парирования отказов ее элементов и подсистем (классическая реконфигурация), но и как технологию рационального перераспределения бортовых ресурсов с целью повышения надежности и живучести функционирования КА. При этом важными становятся задачи автоматического проведения реконфигурации КА средствами БКУ.

**Цель диссертационной работы** заключается в разработке модельно-алгоритмического обеспечения реконфигурации СУД КА для рационального использования бортового ресурса, парирования нештатных ситуаций и повышения надёжности функционирования КА.

Для достижения поставленной цели диссертационного исследования необходимо решить **следующие частные задачи**:

1. Провести системный анализ процесса управления структурной динамикой сложных технических объектов, а также рассмотреть основные особенности проектирования контура бортового управления на современных КА.

2. Осуществить содержательную и теоретико-множественную постановку задачи реконфигурации СУД КА.

3. Разработать методику и алгоритмы проведения реконфигурации СУД КА для рационального использования ресурса бортовой аппаратуры и парирования нештатных ситуаций, возникающих вследствие появления сбоев и отказов БА.

4. Выполнить программную реализацию разработанной модели, методики и алгоритмов в виде прототипа программного комплекса для проведения экспериментов, подтверждающих конструктивность и практическую значимость предложенного программно-алгоритмического обеспечения проведения реконфигурации СУД КА.

В качестве основных **методов исследования** рассматриваются: методы системного анализа, логико-вероятностные методы описания структуры технической систем, методы оптимизации, случайного поиска, методы математического моделирования.

**Положения, выносимые на защиту:**

1) Модель процесса реконфигурации СУД КА на основе системного динамического альтернативного мультиграфа.

2) Алгоритмы выбора рабочей конфигурации бортовой аппаратуры космического аппарата на основе бионического подхода.

3) Методика структурно-функциональной реконфигурации СУД КА при многорежимном функционировании КА.

**Научная новизна** полученных в диссертационной работе результатов, разработанной модели, алгоритмов и методики, заключается в следующем:

1) Предложено формальное описание модели реконфигурации СУД КА на основе системного динамического альтернативного мультиграфа, в которой, *в отличие от известных*, данный процесс был представлен как процесс динамического изменения структурного состояния СУД КА за счёт

варьирования рабочей конфигурации БА СУД и изменения режимов ориентации КА.

2) Разработаны алгоритмы решения задачи выбора рабочей конфигурации бортовой аппаратуры (БА), позволяющие учитывать текущее структурное состояние СУД КА при восстановлении работоспособности после сбоя (отказа БА) и обоснованно осуществлять выбор наиболее предпочтительных вариантов рабочей конфигурации БА СУД для рационального распределения бортового ресурса и парирования нештатных ситуаций.

3) Разработана *оригинальная* методика структурно-функциональной реконфигурации СУД КА, позволяющая без привлечения возможностей наземных средств управления КА комплексно и согласованно применять алгоритмы оптимального выбора рабочей конфигурации БА СУД, что позволяет увеличить значения частных показателей эффективности КА и комплексных показателей надёжности.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Обоснованность и достоверность научных положений, основных выводов и результатов диссертации обеспечивается анализом состояний исследований на сегодняшний день в области управления структурной динамикой сложных систем с перестраиваемой структурой, а также апробацией основных теоретических положений диссертации в научных статьях и докладах на конференциях, семинарах. Корректность алгоритмов рационального выбора рабочей конфигурации БА и методики структурно-функциональной реконфигурации СУД подтверждается согласованностью результатов машинных экспериментов, проведенных с помощью разработанного прототипа программного комплекса (ПК) оценки эффективности структурно-функциональной реконфигурации при управлении КА.

Основные положения и результаты диссертационной работы были представлены на всероссийских и отраслевых конференциях ракетно-космической отрасли, а именно: V российской мультikonференции по проблемам управления «Информационные технологии в управлении - 2012» (ИТУ-2012), г. Санкт-Петербург, 2012 г., VI Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий», г. Москва, 2013 г., IV Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» («Козловские чтения-2015»), г. Самара, 2015 г., III, IV, V Молодёжной научно-технической конференции «Инновационный арсенал молодёжи», г. Санкт-Петербург, 2012-2014 гг.

**Теоретическая и практическая значимость.** Теоретическая значимость диссертационной работы состоит в том, что разработанные содержательная и формальная модели реконфигурации СУД КА могут послужить основой методического обеспечения для решения важной и актуальной задачи автоматизации управления сложными техническими объектами с перестраиваемой структурой (в частности, КА) с целью

обеспечения требуемой степени автономности и живучести, а также повышения эффективности их функционирования. Предложенная постановка задачи реконфигурации СУД КА, алгоритмы выбора рабочей конфигурации БА, методика структурно-функциональной реконфигурации СУД являются в достаточной степени универсальными и применимыми не только для аппаратуры СУД и контура управления угловым движением, но и для других бортовых систем КА.

С точки зрения применения информационных технологий для развития космической техники, предложенная методика и алгоритмы могут быть использованы на борту современных КА в программном обеспечении бортовой вычислительной системы.

Полученные в диссертации результаты были использованы в трёх организациях. В СПИИРАН в рамках проекта программы фундаментальных исследований отделения нанотехнологий и информационных технологий (ОНИТ) РАН (Проект № 2.11) «Комплексное моделирование, многокритериальное оценивание и анализ рисков при выработке управленческих решений в катастрофоустойчивой информационной системе», гранта Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) №11-08-00767-а «Теоретические и экспериментальные исследования процессов реконфигурации структурных состояний катастрофоустойчивых объектов в условиях неопределенности», СЧ ОКР «Разработка комплекса методик и программных средств для оценки надежности бортовой аппаратуры маломассогабаритных космических аппаратов при ее проектировании, наземных испытаниях и эксплуатации», СЧ ОКР «Разработка методик и алгоритмического обеспечения системы комплексного моделирования транспортно-энергетического модуля для расчета и анализа показателей его надежности и живучести». В АО «КБ «Арсенал» при выполнении ОКР по теме «Экипаж» в рамках разработки алгоритмов парирования нештатных ситуаций средствами бортового комплекса управления (БКУ) (автоматическая реконфигурация при возникновении неисправностей приборов системы управления движением), а также в аванпроекте по теме «Перигей» (многофункциональный малый космический аппарат). В рамках данных работ была повышена сбое-отказоустойчивость системы управления движением и обеспечена высокая живучесть функционирования КА в целом. В ГУАП при подготовке специалистов и магистров по направлениям «Информатика и вычислительная техника», «Программная инженерия», «Системный анализ и управление» были внедрены в учебный процесс модель, методика и алгоритмы реконфигурации СУД КА.

**Публикации.** Основные результаты по материалам диссертационной работы опубликованы в 16 печатных работах, из которых четыре в журналах, рекомендованных ВАК РФ («Известия ВУЗов. Приборостроение», «Труды СПИИРАН», «Вестник СибГАУ», «Труды ВКА им. Можайского»).

**Личный вклад автора** в основных публикациях с соавторами кратко характеризуется следующим образом: предложена модель процесса реконфигурации СУД КА при возникновении сбоев и отказов БА; формализована задача выбора рабочей конфигурации БА при проведении реконфигурации на борту КА; представлена методика проведения автоматической реконфигурации системы управления движением, исходя из заданного приборного состава.

**Диссертационная работа** состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Основной текст изложен на 156 листах, содержит 12 таблиц и 29 рисунков. Список цитируемой литературы включает 106 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В первой главе** проведён системный анализ современного состояния исследований в области управления структурной динамикой сложного технического объекта (СТО), рассмотрены основные подходы, сложившиеся на данный момент по организации контура структурного управления в системе управления СТО, проведено обобщённое теоретико-множественное описание задачи реконфигурации СУД КА.

При содержательной постановке задачи реконфигурации СУД рассмотрены основные функции КА наблюдения: съёмка земной поверхности с помощью установленной целевой аппаратуры; передача массивов информации на наземные средства; приём управляющих воздействий с НКУ. Обеспечение выполнения этих функций осуществляет СУД КА совместно с НКУ.

Качество функционирования КА непосредственно зависит от точности ориентации и стабилизации конструкции КА. Так характеристики углового движения важны для работы целевой аппаратуры КА и для осуществления информационного взаимодействия с наземными средствами.

Суть содержательной постановки решаемой задачи проведения реконфигурации СУД КА сводится к следующему:

- **известно:** приборный состав БА СУД, режимы ориентации КА и имеющийся бортовой ресурс.
- **требуется найти:** программу реконфигурации структурных состояний БА КА (рабочей конфигурации БА и режима ориентации) с целью обеспечения заданного (либо оптимального) уровня значений комплексных показателей надежности функционирования КА.

Для формализации поставленной задачи введем в рассмотрение следующие базисные множества:

$B = \{B_j, j = 1, \dots, J\}$  – множество технических средств НКУ;

$C_j = \{C_{j\lambda}, \lambda = 1, \dots, \Lambda_j\}$  – множество каналов информационного взаимодействия  $j$ -го технического средства;

$\Phi = \{\Phi_\pi, \pi = 1, \dots, \mathcal{P}\}$  – множество функций, реализуемых КА для выполнения основной целевой задачи;

$R = \{R_\varepsilon, \varepsilon = 1, \dots, E\}$  – множество режимов ориентации КА;

$\Theta = \{\Theta_s, s = 1, \dots, Z\}$  – множество алгоритмов управления угловым движением, реализуемых СУД в бортовом программном обеспечении КА;

$De = \{De_i, i = 1, \dots, N\}$  – множество бортовой аппаратуры КА;

$W = \{W_k, k = 1, \dots, \Psi\}$  – множество ресурсов КА, обеспечивающих работу его БА и функционирование в целом.

Для формального описания функционирования КА введём в рассмотрение системный динамический альтернативный мультиграф (ДАМГ) следующего вида:

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

где  $\chi \in \{1, 2, 3\}$  – индекс, характеризующий тип структуры КА;

$G_1^t = \langle X_1^t, \Gamma_1^t \rangle$  – описывает функциональную структуру КА;

$G_2^t = \langle X_2^t, \Gamma_2^t \rangle$  – описывает техническую структуру КА;

$G_3^t = \langle X_3^t, \Gamma_3^t \rangle$  – описывает технологическую структуру управления КА и учитывает альтернативные варианты реализации функций КА;

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

Кроме того, зададим множество допустимых операции отображения указанных выше ДАМГ:

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

С учётом вышеизложенного, структурное состояние КА в момент времени  $t$  можно определить, как подмножество декартова произведения множеств элементов, на которых строятся функциональная, техническая и технологическая структуры БА СУД:

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

Введём множество допустимых операций отображения структурных состояний КА:

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

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

При данной формулировке можно исследовать задачу реконфигурации СУД на всём промежутке функционирования и при различных режимах ориентации КА. Интерпретация рассматриваемой задачи управления структурной динамикой СУД сводится к поиску такой последовательности (композиции) выполнения операций отображения вида (3) во времени  $\Upsilon^{t_f} = P_{\langle \delta, \delta_1 \rangle}^{t_1} \circ P_{\langle \delta_1, \delta_2 \rangle}^{t_2} \circ \dots \circ P_{\langle \delta_{l-1}, \delta_l \rangle}^{t_f}$ , при которой обеспечивается выбор наиболее предпочтительной программы реконфигурации СУД  $\Upsilon_*^{t_f}$ .

С учётом вышеизложенного динамическая постановка задачи реконфигурации СУД может быть сформулирована следующим образом: необходимо разработать модели, методы и алгоритмы, позволяющие

находить наиболее предпочтительную последовательность изменения структурных состояний КА  $\Upsilon_*^{t_f}$ , при которой выполняются следующие условия:

$$\mathfrak{Z}(X_{\chi}^t, \Gamma_{\chi}^t, M_{\langle \chi, \chi' \rangle}^t, \Pi_{\langle \delta, \delta' \rangle}^t, t \in (t_0, t_f]) \rightarrow \text{extr}, \quad \Upsilon^{t_f} \in \Delta_g$$

$\Delta_g = \{ \Upsilon^{t_f} | \Upsilon^{t_f} = \Pi_{\langle \delta, \delta_1 \rangle}^{t_1} \circ \Pi_{\langle \delta_1, \delta_2 \rangle}^{t_2} \circ \dots \circ \Pi_{\langle \delta'', \delta' \rangle}^{t_f}; R_{\beta}(X_{\chi}^t, \Gamma_{\chi}^t, M_{\langle \chi, \chi' \rangle}^t, \Pi_{\langle \delta, \delta' \rangle}^t) \leq \tilde{R}_g; \beta \in \mathbb{B} \}$ , где  $\mathfrak{Z}$  – показатель или набор показателей, характеризующих качество функционирования КА (в качестве таких показателей могут быть использованы коэффициент технического использования и коэффициент сохранения эффективности),  $\mathbb{B}$  – множество номеров ограничений, определяющих функционирование КА,  $\tilde{R}_g$  – заданные величины, определяющие эти ограничения,  $\Delta_g$  – множество программ управления, удовлетворяющих ограничениям на функционирование КА.

**Во второй главе** рассмотрена задача выбора рабочей конфигурации БА, необходимая для построения последовательности изменения структурных состояний КА. Для исследования возможных сценариев проведения реконфигурации СУД КА выбран общий логико-вероятностный метод (ОЛВМ), как наиболее универсальный метод структурно-логического описания структур сложных систем. Приведён типовой состав БА СУД в виде подсистемы чувствительных элементов и исполнительных органов системы управления движением. Рассмотрена постановка задачи выбора рабочей конфигурации БА в виде задачи дискретного (булева) программирования с нелинейной целевой функцией и нелинейными ограничениями.

Структуру СУД КА можно представить в виде графических схем функционирования, где в узлах схемы будут находиться технические объекты (БА), а связи между ними будут характеризовать информационный обмен необходимый для реализации алгоритмов управления на борту КА. В результате анализа графических схем можно найти соответствующий структурный полином и оценку структурной надёжности системы (в случае, когда структура системы неоднородна, т.е. ее элементы имеют различные вероятности работоспособности (отказа)):

$$F(s_v) = \mathcal{R}(P_1, P_2, \dots, P_n, Q_1, Q_2, \dots, Q_n) |_{P_i=0.5, Q_i=0.5},$$

где  $F(s_v)$  – оценка структурной надёжности для состояния  $s_v$ ,  $\mathcal{R}(P_1, P_2, \dots, P_n, Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$  – вероятностный полином, где  $P_i$  – вероятность работоспособности элемента,  $Q_i = 1 - P_i$  – вероятность отказа элемента.

В диссертационной работе в качестве примера подробно рассмотрено функционирование СУД КА. Приборы СУД можно разбить на две группы: исполнительные органы (ИО) и чувствительные элементы (ЧЭ).

Каждую группу можно условно объединить в соответствующую подсистему. Подсистеме ЧЭ будет соответствовать несколько схем определения ориентации (СхО) КА, а подсистеме ИО – несколько режимов

стабилизации. Для каждой схемы ориентации и режима стабилизации строятся функциональные структуры СУД. В данной работе условно рассматриваются три схемы ориентации: основная (ОСхО), дополнительная (ДСхО) и экстренная (ЭСхО) и два режима стабилизации: на двигателях-маховиках (ДМ) и на жидкостных ракетных двигателях (ЖРД).

Задача синтеза новых структурных состояний СУД КА сводится к выбору режима функционирования КА (соответствующих схем ориентации и режимов стабилизации) и выбору рабочей конфигурации БА.

Задача выбора конфигурации БА может быть формализована в виде задачи математического программирования (5)-(7). Решением данной задачи является оптимальный состав включённой в контур управления БА (оптимальная рабочая конфигурация БА СУД КА), обеспечивающий функционирование КА в заданном режиме с учетом ресурсных ограничений.

Максимизируя суммарное время работы КА, которое зависит от временного ресурса всей БА с учётом её сбоев и неопределённости момента возникновения отказа БА, будем на протяжении всего периода эксплуатации КА равномерно загружать БА с учетом их наработки на отказ. Тогда задача выбора будет выглядеть следующим образом:

$$C(\vec{u}) = \frac{\sum_{i=1}^N c_i \cdot u_i}{\sum_{i=1}^N u_i} \rightarrow \max, \quad \vec{u} \in \Delta, \quad (5)$$

$$\Delta = \{\vec{u} = (u_1, \dots, u_N) | Z_0(\vec{u}) > 0, Z_1(\vec{u}) \leq Z_{КА}\} \quad (6)$$

$$Z_0(\vec{u}) > 0, \quad (6)$$

$$Z_1(\vec{u}) \leq Z_{КА}, \quad (7)$$

где  $\vec{u} = (u_1, \dots, u_N)$  – рабочая конфигурация БА СУД,  $Z_0(\vec{u}) = \mathcal{R}(u_1 P_1, \dots, u_n P_n, \bar{u}_1 Q_1, \dots, \bar{u}_n Q_n) |_{P_i=0.5, Q_i=0.5, i=1, \dots, n}$  – вероятностный полином структурной надёжности СУД;  $Z_1(\vec{u}) = \sum_{i=1}^n p_i \cdot u_i$  – мощность потребляемой электроэнергии рабочей конфигурацией БА  $\vec{u}$ ,  $Z_{КА}$  – допустимое суммарное энергопотребление на КА,  $c_i = \frac{T_i^p - \tau_i}{T_i^p}$  – коэффициент расходования временного ресурса  $i$ -й БА,  $T_i^p$ ,  $\tau_i$  – временной ресурс и текущая наработка  $i$ -го прибора.

С помощью критерия  $C(\vec{u}) = \frac{\sum_{i=1}^n c_i \cdot u_i}{\sum_{i=1}^n u_i} \rightarrow \max$  обеспечивается равномерный расход временного ресурса бортовой аппаратуры для максимизации общего времени работы КА.

**В третьей главе** проведён анализ сценариев реконфигурации СУД КА. В зависимости от роли НКУ в проведении реконфигурации, выделим три типа управления структурной динамикой на борту КА: проведение реконфигурации СУД по командам с НКУ, частичное задействование НКУ для реконфигурации СУД, автоматическая реконфигурация СУД проводимая при помощи собственных вычислительных средств.

В диссертации разработана методика структурно-функциональной реконфигурации СУД КА. Для решения задачи выбора рабочей

конфигурации БА разработаны соответствующие алгоритмы на основе бионического подхода.

Автоматизация реконфигурация необходима для повышения автономности КА при возникновении сбоев и отказов БА. Роль НКУ в этом случае сводится к контролю технического состояния КА и его бортовых систем.

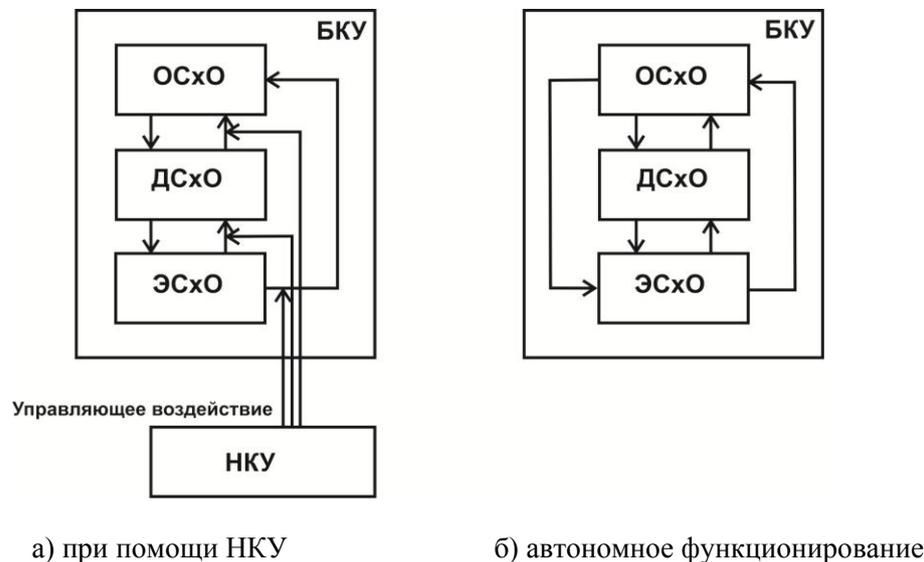


Рисунок 1. Технологии управления КА с реконфигурацией при смене схем ориентации

Предлагаемая в работе методика структурно-функциональной реконфигурации СУД КА включает в себя следующие шаги:

**Шаг 0.** Локализация нештатной ситуации.

**Шаг 1.** Анализ работоспособности БА.

**Шаг 2.** Если включение необходимой конфигурации БА для текущего режима невозможно, то переход к альтернативному режиму.

**Шаг 3.** Если включение рабочей конфигурации БА для альтернативного режима ориентации невозможно, то осуществляется переход на режим с пониженной эффективностью.

**Шаг 4.** Если включение рабочей конфигурации БА для режима ориентации с пониженной эффективностью также невозможно, то КА переводится в режим неориентированного полёта (НП). Вывод КА из режима НП осуществляется по командам с НКУ.

**Шаг 5.** Если сбоившая ранее аппаратура была восстановлена, то производится поиск рабочей конфигурации БА для режима ориентации обеспечивающего выполнением штатных функций КА, в противном случае для альтернативного режима с пониженной эффективностью.

**Шаг 6.** Через заданное время вычислительными средствами КА анализируется состояние БА и текущий режим ориентации. Если КА функционирует в режиме с пониженной эффективностью, то осуществляется поиск рабочей конфигурации для режима, обеспечивающего выполнением штатных функций КА.

Для выбора рабочей конфигурации БА требуется решить задачу математического программирования (5) – (7), представленную в главе 2. Для этого будем использовать бионический подход. Сущность бионического подхода состоит в повторяющихся испытаниях. Для каждого испытания будем получать рабочую конфигурацию БА из числа допустимых альтернатив. По окончании работы алгоритма будет выбрана наилучшая конфигурация.

Ограничение (6) учитывает структурное построение СУД, где  $Z_0(\vec{u}) = \mathcal{R}(u_1 P_1, \dots, u_n P_n, \bar{u}_1 Q_1, \dots, \bar{u}_n Q_n) |_{P_i=0.5, Q_i=0.5, i=1, \dots, n} > 0$  – условие работоспособности СУД для технической состояний с выбранной рабочей конфигурации БА  $\vec{u}$  в заданном режиме ориентации КА,  $\mathcal{R}(P_1, \dots, P_n, Q_1, \dots, Q_n)$  – вероятностный полином структурной надежности СУД для заданного режима ориентации КА. Ограничение (7)  $Z_1(\vec{u}) \leq Z_{КА}$  учитывает энергопотребление конфигурации БА, где  $Z_1(\vec{u})$  – мощность потребляемой электроэнергии рабочей конфигурацией БА  $\vec{u}$  (см. глава 2).

Задачу математического программирования (5) – (7) предлагается решать следующим образом. Сначала генерируем множество альтернатив, удовлетворяющих ограничениям задачи (2.22), (2.23), затем выбираем из полученного множества альтернатив наилучшую альтернативу по критерию  $C(\vec{u}) = \frac{\sum_{i=1}^n c_i \cdot u_i}{\sum_{i=1}^n u_i} \rightarrow \max$  (5) равномерной загрузки БА с учётом их наработки на отказ.

Введём в рассмотрение некоторое текущее состояние КА  $S_k$ , для которого определяется вектор рабочей конфигурации БА  $\vec{u}^k$ . Оценка структурной надёжности для данного состояния вычисляется по следующей формуле:

$$Z_0(\vec{u}^k) = \mathcal{R}\left(u_1^k P_1, \dots, u_n^k P_n, \bar{u}_1^k Q_1, \dots, \bar{u}_n^k Q_n\right) \Big|_{P_i=0.5, Q_i=0.5, i=1, \dots, n}$$

Если  $Z_0(\vec{u}^k) = 0$ , то состояние  $S_k$  считается неработоспособным. Тогда требуется выбрать и ввести в структуру СУД необходимую работоспособную бортовую аппаратуру. Новое состояние будет характеризоваться вектором  $\vec{u}^{k+1} = \vec{u}^k \oplus \vec{e}_j$ , где  $\vec{e}_j = (0_1, \dots, 1_j, \dots, 0_n)$  – вектор, соответствующий включению некоторой исправной  $j$ -й БА в контур управления угловым движением КА,  $\oplus$  – оператор булева сложения. Если после ввода  $j$ -й БА состояние  $S_{k+1}$  остаётся неработоспособным ( $Z_0(\vec{u}^{k+1}) = 0$ ), то процесс формирования рабочей конфигурации БА следует продолжить. В противном случае ( $Z_0(\vec{u}^{k+1}) > 0$ ) процесс завершается.

Примем за начальное состояние КА  $S_0$  такое, когда ни одна БА не включена в рабочую конфигурацию СУД (т.е.  $\vec{u}^0 = (0, 0, \dots, 0)$ ,  $Z_0(\vec{u}^0) = 0$ ). Тогда сценарий включения элементов в структуру СУД можно представить следующей последовательностью  $\vec{u}^0 \xrightarrow{e_{j_1}=1} \dots \vec{u}^{k-1} \xrightarrow{e_{j_k}=1} \vec{u}^k \dots \rightarrow$ .

Для текущего состояния  $S_k$  каждая работоспособная и не включённая в конфигурацию  $\vec{u}^k$   $j$ -я БА, характеризуется структурной значимостью:

$$\xi_j(\vec{u}^k) = \Xi_j(u_1^k P_1, \dots, u_n^k P_n, \overline{u_1^k} Q_1, \dots, \overline{u_n^k} Q_n) \Big|_{P_i=0.5, Q_i=0.5, i=1, \dots, n}$$

где  $\xi_j$  отражает суммарный вклад данного элемента в структурную надежность для контура управления угловым движением КА с учетом уже включенных элементов.

В зависимости от правила выбора конкретной БА для включения в рабочую конфигурацию задача математического программирования решается двумя алгоритмами. Это «жадный» алгоритм, для которого на каждом шаге выбирается элемент (БА) с максимальной структурной значимостью, и алгоритм случайного направленного поиска, где выбор осуществляется случайно, но вероятнее для элемента с большей значимостью.

### **«Жадный» алгоритм**

**Шаг 0.** Исходное состояние.  $k = 0, \vec{u}^k = \vec{0}$ .

**Шаг 1.** Список значимости для «восстанавливаемых» и исправных элементов структуры. Формируем полином  $\mathcal{R}_{k+1}(P_1, \dots, P_n, Q_1, \dots, Q_n) = \mathcal{R}P_1, \dots, P_n, Q_1, \dots, Q_n \text{ } P_i=1, Q_i=0, \text{ если } u_i^k=1 \text{ } i=1, \dots, n$  из исходного полинома характеризующего работу СУД  $\mathcal{R}_k(P_1, \dots, P_n, Q_1, \dots, Q_n)$ . Вычисляем значимости для работоспособных элементов  $\{\xi_j(\vec{u}^k) | u_j^k = 0, x_j - \text{работоспособное}, j = 1, \dots, n\}$ , соответствующих нулевым позициям в векторе  $\vec{u}^k$ . Значимости элементов вычисляются с использованием полинома  $\mathcal{R}_{k+1}$ .

**Шаг 2.** Выбор «восстанавливаемого» элемента.

$$\xi_{j_k} = \max\{\xi_j(\vec{u}^k) | u_j^k = 0, x_j - \text{работоспособное}, j = 1, \dots, n\}$$

**Шаг 3.** Формируем вектор рабочей конфигурации БА.  $k ::= +1, \vec{u}^k = \vec{u}^{k-1} \oplus \vec{e}_{j_{k-1}}^k$ , где  $\vec{e}_{j_{k-1}}^k = (0_1, \dots, 1_{j_{k-1}}, \dots, 0_n)$ .

### **Алгоритм случайного направленного поиска**

**Шаг 0.** Исходное состояние.  $k = 0, \vec{u}^k = \vec{0}$ .

**Шаг 1.** Список значимости для «восстанавливаемых» и исправных элементов структуры. Формируем полином  $\mathcal{R}_{k+1}(P_1, \dots, P_n, Q_1, \dots, Q_n) = \mathcal{R}P_1, \dots, P_n, Q_1, \dots, Q_n \text{ } P_i=1, Q_i=0, \text{ если } u_i^k=1 \text{ } i=1, \dots, n$  из исходного полинома характеризующего работу СУД  $\mathcal{R}_k(P_1, \dots, P_n, Q_1, \dots, Q_n)$ . Вычисляем значимости для работоспособных элементов  $\{\xi_j(\vec{u}^k) | u_j^k = 0, x_j - \text{работоспособное}, j = 1, \dots, n\}$ , соответствующих нулевым позициям в векторе  $\vec{u}^k$ . Значимости элементов вычисляются с использованием полинома  $\mathcal{R}_{k+1}$ .

**Шаг 2.** Выбор «восстанавливаемого» элемента.

$$\xi_{j_k} = \max\{\xi_j(\vec{u}^k) | u_j^k = 0, x_j - \text{работоспособное}, j = 1, \dots, n\}$$

**Шаг 3.** Формируем вектор рабочей конфигурации БА.  $k ::= +1, \vec{u}^k = \vec{u}^{k-1} \oplus \vec{e}_{j_{k-1}}^k$ , где  $\vec{e}_{j_{k-1}}^k = (0_1, \dots, 1_{j_{k-1}}, \dots, 0_n)$ .

**Шаг 4.** Анализ работоспособности для конфигурации  $\vec{u}^k$ . Если  $Z_0(\vec{u}^k) = 0$ , то переход на шаг 1. Иначе если  $Z_0(\vec{u}^k) > 0$ , переход на шаг 5.

**Шаг 5.** Формирование вектора рабочей конфигурации. Сохраняем вектор рабочей конфигурации БА  $\vec{u}^* = \vec{u}^k$ , выход из алгоритма.

После того как сформировано множество перспективных альтернатив с помощью «жадного» алгоритма или алгоритма случайного направленного поиска, выбираем из них наилучшую по критерию  $C(\vec{u}) = \frac{\sum_{i=1}^n c_i \cdot u_i}{\sum_{i=1}^n u_i} \rightarrow \max$ .

**В четвёртой главе** разработан прототип программного комплекса (ПК) «Реконфигурация» для моделирования функционирования КА с учётом сбоев и отказов БА СУД. С помощью ПК «Реконфигурация» промоделированы и исследованы различные сценарии реконфигурации технической структуры СУД КА: 1) «стандартная» реконфигурация проводится только по командам с НКУ в зонах радиовидимости КА, 2) «стандартная» реконфигурация, проводимая автоматически СУД, кроме аварийной ситуации, когда необходим анализ нештатной ситуации на Земле, 3) структурно-функциональная реконфигурация, проводимая автоматически СУД. Была проведена серия экспериментов, которая подтвердила преимущества структурно-функциональной реконфигурации СУД КА по сравнению со «стандартной» реконфигурацией.

Были получены следующие результаты моделирования. Число успешно проведённых сеансов целевой аппаратуры КА со структурно-функциональной реконфигурацией СУД увеличилось на ~50% по сравнению со «стандартной» реконфигурацией, проводимой с НКУ, и на ~30% по сравнению со «стандартной» реконфигурацией, проводимой в автоматическом режиме. Значения комплексных показателей надёжности соответственно увеличиваются для коэффициента технического использования и для коэффициента сохранения эффективности для проведённых сеансов на ~45% для «стандартной» реконфигурация по командам с НКУ и ~25% для «стандартная» реконфигурация в автоматическом режиме.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведённого диссертационного исследования, формулировки и решения поставленной научной задачи разработки модельно-алгоритмического обеспечения реконфигурации СУД КА при различных технологиях управления, были получены следующие научные и практические результаты.

1. Обоснована актуальность и проведён системный анализ задачи управления структурной динамикой СУД КА. Разработана концептуальная и формальная модель процесса реконфигурации СУД КА на основе динамического альтернативного мультиграфа, позволяющего учитывать смены режимов ориентации КА и выбор рабочей конфигурации БА.

2. Проведены исследования реконфигурации СУД КА, элементами которой являются чувствительные элементы и исполнительные органы, а связи определяются их взаимодействием в рамках реализации конкретной схемы ориентации или режима стабилизации КА.

3. Задача выбора рабочей конфигурации БА при проведении реконфигурации СУД формализована в виде задачи математического программирования равномерного распределения временного ресурса БА с учетом ограничений на энергопотребление и работоспособность технической структуры СУД.

4. Разработана методика проведения структурно-функциональной реконфигурации СУД для автоматизации её на борту КА. Рассмотрены алгоритмы «стандартной» реконфигурации СУД.

5. Разработаны алгоритмы нахождения субоптимального решения задачи выбора рабочей конфигурации БА на основе «жадного» алгоритма (эвристический подход) и алгоритма случайного направленного поиска (бионический подход). Данные алгоритмы являются ядром методики проведения структурно-функциональной реконфигурации СУД КА.

6. Разработан прототип программного комплекса для моделирования функционирования КА с учётом сбоев и отказов БА СУД. Произведены машинные эксперименты моделирования функционирования КА для различных сценариев реконфигурации СУД КА. Эксперименты показали преимущества применения структурно-функциональной реконфигурации на борту КА.

Дальнейшее развитие научных исследований в данной области целесообразно проводить в следующих направлениях:

- моделирование процессов функционирования КА с учётом сбоев и отказов БА (с учётом расхода/пополнения бортового ресурса, проведение имитационного моделирования переходных процессов);
- разработка теоретических основ управления структурной динамикой КА.

Полученные результаты соответствуют п. 2 «Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации», п. 4 «Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации», п.5 «Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации» и п. 10 «Методы и алгоритмы прогнозирования и оценки эффективности, качества и надежности сложных систем» паспорта специальности 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации (технические системы)».

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Публикации в журналах, входящих в перечень ВАК:*

1. Кулаков, А.Ю. Модель оценивания расхода топлива космического аппарата с учётом нештатных ситуаций / А.Ю. Кулаков // Известия ВУЗов. Приборостроение. – 2014. – т. 57, №11 – С. 30-34
2. Кулаков, А.Ю. Функциональная реконфигурация чувствительных элементов СУД КА / А.Ю. Кулаков, А.Н. Павлов, Д.А. Павлов // Труды СПИИРАН. – 2013. – Вып. 5(28), – С. 169-181
3. Игнатъев, М.Г. Программный комплекс моделирования стабилизированного движения космического аппарата с трансформируемыми упругими элементами конструкции / М.Г. Игнатъев, В.М. Копылов, А.Ю. Кулаков, М.В. Сотников // Вестник СибГАУ. – 2013. – №3, – С. 45-48
4. Павлов, А.Н. Подход к исследованию структурно-функциональной реконфигурации системы управления движением космического аппарата / А.Н. Павлов, К.Л. Григорьев, С.А. Осипенко, А.А. Слинко, А.Ю. Кулаков // «Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского». – 2016. – Вып. 655. – С. 17-23

*Другие публикации:*

1. Кулаков, А.Ю. Влияние сбоев и отказов системы управления движения на топливный ресурс космического аппарата и его срок активного существования / А.Ю. Кулаков // Инновационный арсенал молодёжи: труды пятой науч.-техн. конф. – 2014. – С. 139-142
2. Кулаков, А.Ю. Задача выбора оптимальной конфигурации бортовых средств космического аппарата / А.Ю. Кулаков // Актуальные проблемы ракетно-космической техники: материалы четвёртой всероссийской науч.-техн. конф. – 2015. – С. 126-128
3. Павлов, А.Н. Структурная реконфигурация сложных объектов / А.Н. Павлов, В.А. Зеленцов, А.Ю. Кулаков // Журнал «Труды международного симпозиума надёжность и качество». – 2012. – С. 146-148
4. Павлов, А.Н. Об оценках структурной устойчивости монотонной системы / А.Н. Павлов, А.В. Панькин, А.Ю. Кулаков // Кибернетика и высокие технологии: материалы XIII междунар. науч.-техн. конф. – 2012. – С. 22-31
5. Павлов, А.Н. Динамическая модель управляемой реконфигурации дистрибуционной сети цепи поставок / А.Н. Павлов, Б.В. Соколов, Д.А. Иванов, А.Ю. Кулаков // Логистика: современные тенденции развития: материалы XI Междунар. науч.-практ. конф. – 2012. – С. 249-252
6. Павлов, А.Н. Способ формализованного описания и анализа структур сложных объектов / А.Н. Павлов, А.Ю. Кулаков, А.В. Войтович // Материалы конференции «Информационные технологии в управлении» (ИТУ-2012). – 2012. – С. 317-320.

7. Павлов, А.Н. Направления решения проблемы планирования структурно-функциональной реконфигурации сложных объектов / А.Н. Павлов., А.Ю. Кулаков, А.В. Войтович, Д.А. Павлов // XIII Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика (РИ-2012)» . – 2012. – С. 48

8. Павлов, А.Н. Многокритериальный анализ критичности отказов функциональных элементов общесудовых систем и канализации электроэнергии судна / А.Н. Павлов, А.Ю. Кулаков, Д.А. Павлов // Первая научно-практическая конференция «Современные технологии автоматизации процессов борьбы за живучесть». – 2012. – С. 72-73

9. Павлов, А.Н. Методология и технологии многокритериального анализа критичности отказов функциональных элементов общесудовых систем / А.Н. Павлов, А.Ю. Кулаков, Д.А. Павлов // Вторая международная научно-практическая конференция «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем». – 2013. – С. 78-85

10. Копылов, В.М. Автоматическая диагностика и реконфигурация бортовых систем космического аппарата на основе телеметрических данных / В.М. Копылов, А.Ю. Кулаков // Инновационный арсенал молодёжи: труды пятой науч.-техн. конф. – 2014. – С. 143-145

11. Кулаков, А.Ю. Повышение эффективности функционирования КА ДЗЗ за счёт структурного и функционального резерва / А.Ю. Кулаков // Инновационный арсенал молодёжи: труды четвёртой науч.-техн. конф. – 2013. – С. 139-142

12. Pavlov, A.N. Complex modeling of the structural-functional reconfiguration of supply chain / A.N. Pavlov, B.V. Sokolov, V.A. Zelentsov, A.Yu. Kulakov, D.A. Ivanov // Proceedings of the 12th International Conference “Reliability and Statistics in Transportation and Communication” (RelStat’12). – 2012. – P. 261-265