

Научная статья

УДК 519.8

DOI: [10.34759/trd-2022-126-18](https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-18)

## **ЗАДАЧА ПЛАНИРОВАНИЯ РЕКОНФИГУРАЦИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ В УСЛОВИЯХ НЕИЗВЕСТНОЙ ЦИКЛОГРАММЫ ЕГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ**

**Александр Николаевич Павлов<sup>1</sup>, Александр Бахтиёрович Умаров<sup>2</sup>,**

**Александр Юрьевич Кулаков<sup>3</sup>, Андрей Владимирович Гордеев<sup>4</sup>**

<sup>1,2,4</sup>Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

Санкт-Петербург, Россия

<sup>1,3</sup>Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук,

Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>[vka@mil.ru](mailto:vka@mil.ru)

<sup>3</sup>[spiiras.nw.ru](mailto:spiiras.nw.ru)

*Аннотация.* Особую важность в настоящее время при разработке и эксплуатации малых космических аппаратов (МКА) приобретают вопросы обеспечения требуемой степени автономности и живучести, а также повышения эффективности функционирования МКА в различных условиях обстановки. Актуальность решения указанных задач для малых космических аппаратов наблюдения вызвана, с одной

стороны, особенностями орбиты, на которых функционирует данный тип аппаратов, с другой стороны, отсутствием возможности своевременного управления при возникновении нештатных ситуаций на борту МКА. Для обеспечения автономности и живучести малого космического аппарата необходимо, чтобы он находился в работоспособном состоянии максимальное время или оперативно восстанавливал свою работоспособность. То есть необходимо иметь возможность изменять (перестраивать) структуру (структуры) МКА 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 объектов (СТО) в рамках развиваемой в настоящее время теории управления структурной динамикой получил такой вариант управления структурами СТО как реконфигурация.

В настоящей статье предложен метод решения задачи планирования структурно-функциональной реконфигурации в условиях неизвестной циклограммы задействования режимов функционирования СТО на примере системы управления движением и навигации (СУДН) МКА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Проведен вычислительный эксперимент на примере МКА ДЗЗ «Аист-2Д».

**Ключевые слова:** циклограмма функционирования, «слепая» и структурно-функциональная реконфигурация, параметрический геном, сложный многорежимный объект

**Финансирование:** Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ (№№20-08-01046), в рамках

бюджетной темы FFZF–2022–0004

*Для цитирования:* Павлов А.Н., Умаров А.Б., Кулаков А.Ю., Гордеев А.В. Задача планирования реконфигурации системы управления движением малого космического аппарата дистанционного зондирования земли в условиях неизвестной циклограммы его функционирования // Труды МАИ. 2022. № 126. DOI: [10.34759/trd-2022-126-18](https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-18)

Original article

## **THE PROBLEM OF PLANNING THE RECONFIGURATION OF THE MOTION CONTROL SYSTEM OF A SMALL SPACE VEHICLE FOR REMOTE EARTH SENSING UNDER THE CONDITIONS OF THE UNKNOWN CYCLOGRAM OF ITS FUNCTIONING**

**Alexander N. Pavlov<sup>1</sup>, Alexander B. Umarov<sup>2</sup>, Alexander Yu. Kulakov<sup>3</sup>,  
Andrey V. Gordeev<sup>4</sup>**

<sup>1,2,4</sup>Military space Academy named after A.F.Mozhaysky,  
Saint-Petersburg, Russia

<sup>1,3</sup>Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russia

<sup>2</sup>[vka@mil.ru](mailto:vka@mil.ru)

<sup>3</sup>[spiras.nw.ru](http://spiras.nw.ru)

**Abstract.** Of particular importance at the present time in the development and operation of small spacecraft are the issues of ensuring the required degree of autonomy and survivability, as well as increasing the efficiency of the small spacecraft in various environmental conditions. The relevance of solving these problems for small observation spacecraft is caused, on the one hand, by the peculiarities of the orbit on which this type of

spacecraft operates, and on the other hand, by the lack of the possibility of timely control in the event of emergency situations on board the small spacecraft. To ensure the autonomy and survivability of a small spacecraft, it is necessary that it be in working condition for a maximum time or quickly restore its working capacity. That is, it is necessary to be able to change (rebuild) the structure (structures) of the small spacecraft in various environmental conditions in order to maintain the required level of performance. In practice, when solving problems of ensuring reliability, survivability, disaster tolerance and fault tolerance of complex technical systems within the framework of the currently developed theory of structural dynamics control, such a variant of managing the structures of a complex technical object as reconfiguration has become widespread.

This article proposes a method for solving the problem of planning the reconfiguration of a complex technical object based on structural and functional reconfiguration under the conditions of an unknown cyclogram of the activation of the complex technical object operating modes. A computational experiment was carried out on the example of a small spacecraft for remote sensing of the Earth "Aist-2D".

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

**Funding:** Research carried out on this topic was carried out with partial financial support from RFBR grants (No. 20-08-01046), under the budget theme FFZF–2022–0004

**For citation:** Pavlov A.N., Umarov A.B., Kulakov A.Yu., Gordeev A.V. The problem of planning the reconfiguration of the motion control system of a small space vehicle for remote earth sensing under the conditions of the unknown cyclogram of its functioning.

*Trudy MAI*, 2022, no. 126. DOI: [10.34759/trd-2022-126-18](https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-18)

## Введение

Одним из неотъемлемых направлений научно-технического прогресса, несомненно, можно считать усложнение существующих и возникновение новых сложных многорежимных объектов с перестраиваемой структурой.

Сложность указанных объектов объясняется несколькими факторами, среди которых можно выделить: увеличение количества элементов и подсистем, входящих в состав данного объекта; высокие требования к учету влияния внешней среды; стремительное увеличение количества внутренних связей между элементами, а также принципами и механизмами их взаимодействия.

Всё это приводит, прежде всего, к повышению структурной, функциональной, технологической сложности исследуемого объекта.

При этом всё более важным становится учет структурной динамики сложных многорежимных объектов, которая заключается в непрерывном изменении на протяжении всего срока их активного существования параметров функционирования и характеристик. Такие изменения возникают вследствие воздействия самых разнообразных причин субъективного и объективного характера.

Далее в качестве такого многорежимного объекта будем рассматривать СУДН МКА, являющуюся одной из важнейших систем бортового комплекса управления (БКУ) МКА на солнечно-синхронной орбите.

Пусть целью данного МКА ДЗЗ является съёмка требуемых районов или объектов земной поверхности на территории Российской Федерации. Тогда

функционирование МКА на витке может быть схематично изображено следующим образом (см. рисунок 1).

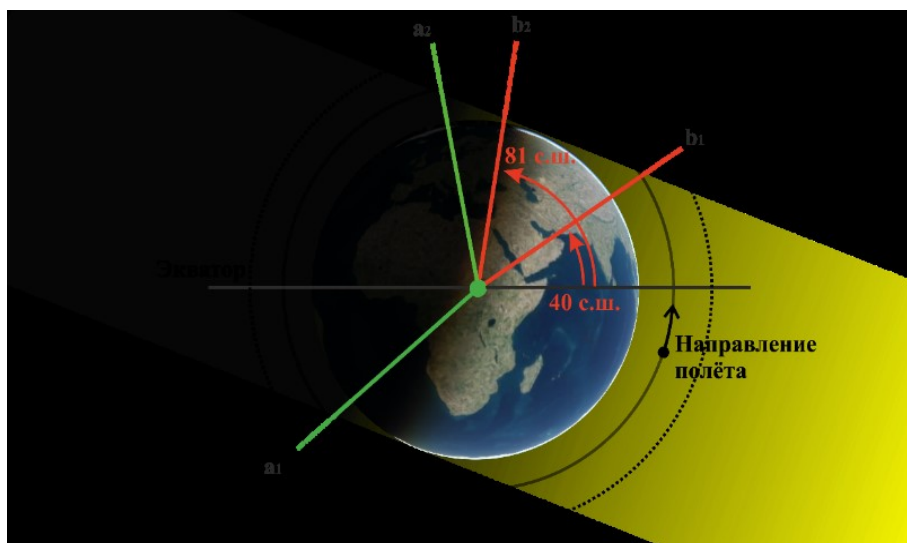


Рис.1 – Участки функционирования МКА на витке

На рис.1 меньшей дугой  $a_1 a_2$  показан теневой участок орбиты. Точками  $b_1$  и  $b_2$  обозначим границы широт, в которых располагается территория Российской Федерации, то есть полоса земной поверхности, в которой необходимо проводить съемку объектов ( $40^\circ$  и  $81^\circ$  соответственно). Реализацию серии программных поворотов (ПП) оси МКА (сонаправленной с главной осью целевой аппаратуры (ЦА)) будем называть **целевым режимом ориентации МКА** и обозначать данный **режим  $R_1$** . Для осуществления съёмки части земной поверхности либо объекта наблюдения (ОН) МКА ДЗЗ совершает ПП из орбитальной системы координат (ОСК), чтобы совместить главную ось ЦА с направлением на заданную область (ОН) и удерживать такое положение на протяжении всего временного интервала, в течение которого производится съемка. После выполнения указанных действий МКА либо переориентируется на новый ОН, либо возвращается в ОСК посредством очередного ПП.

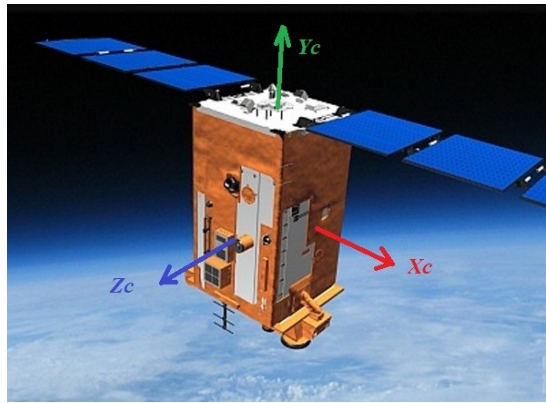


Рис.2 – Пример связанной с МКА системы координат и расположения панели солнечных батарей

При пролете МКА на солнечных интервалах витка, которые обозначены дугами  $a_1 b_1$  и  $b_2 a_2$ , ось  $Y_c$  МКА, сонаправленную с нормалью к панели солнечных батарей (ПСБ), целесообразно разворачивать в направлении на Солнце. Такой *режим ориентации* будет называться «*солнечной*» и обозначим как режим  $R_2$ . Для разгрузки накопленного кинетического момента системы двигателей-маховиков МКА необходимо перевести в ориентацию в ОСК и задействовать магнитометры и электромагниты в те интервалы времени, когда МКА находится на теневых участках орбиты. Указанные действия определяют задействование МКА следующего *режима ориентации*  $R_3$ , который называется «*сбросом кинетического момента*» (СКМ).

Так как дуга от  $b_2$  до  $a_2$  занимает небольшую часть времени витка, при этом некоторое время будет затрачено на переориентацию из ОСК в «солнечную» ориентацию и обратно в ОСК для СКМ. А также учитывая, что в приполярных областях направление магнитных линий способствуют разгрузке кинетического момента по оси  $Z_c$  МКА (см. рис. 2 из условия, что в ОСК ось  $X_c$  ориентирована по

направлению полёта), то будет целесообразным режим  $R_3$  начинать непосредственно с точки  $b_2$ .

Описанная логика работы МКА изображена на рис. 3. Обозначения  $E\uparrow$ ,  $E\downarrow$ ,  $\Delta K\uparrow$ ,  $\Delta K\downarrow$  характеризуют положительный и отрицательный энергобаланс МКА и расходование (накопление и сброс) кинетического момента соответственно.

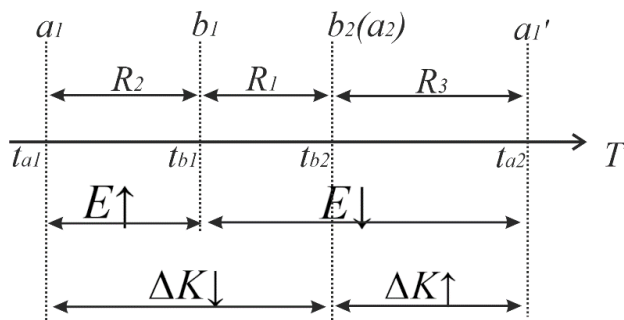


Рис.3 – Циклограмма смены режимов ориентации МКА на витке для обеспечения работы по целевому назначению

Так как съёмка заданного участка земной поверхности либо ОН возможна только в определенные временные интервалы, а именно, когда область или ОН находится в зоне видимости МКА, то вне этих интервалов времени логика работы МКА вырождается до смены двух режимов  $R_2$  и  $R_3$ , границы между которыми определяются исходя из реального состояния энергоресурсов, накопленного кинетического момента и предстоящих операций и целевых задач.

Еще одним режимом функционирования СУДН МКА является режим «*выдачи корректирующего импульса*» (*ВКИ*), который обозначим через  $R_4$ . Данный режим ориентации заключается в выработке периодических импульсов коррекции орбиты на стационарных плазменных двигателях (СПД).



Логика работы МКА на витках, когда территория РФ затенена представлена на рисунке 4.

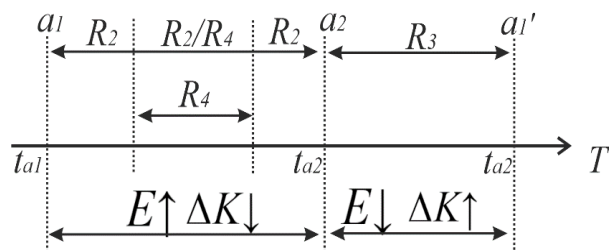


Рис.4 – Циклограмма смены режимов ориентации МКА на витке для обеспечения восстановления бортового ресурса и ВКИ

Далее рассмотрим бортовую аппаратуру (БА), используемую для обеспечения применяемых на МКА **режимов ориентации** ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_4$ ). Будем предполагать, что используемые на МКА типы чувствительных элементов (ЧЭ) и исполнительных органов (ИО) СУДН включают в себя [1-3]: солнечные датчики (двух и однокоординатные); магнитометры; звездные датчики; автономные системы навигации; измерители угловых скоростей (одноосные и многоосные); двигатели-маховики (ДМ); электромагниты (ЭМ).

Функционально с учётом расположения относительно центра масс исполнительными органами СУДН могут являться СПД системы коррекции орбиты.

Зная состав БА СУДН, её расположение на МКА, а также требуемые режимы ориентации специалист по системам управления движением может составить соответствующие схемы ориентации, учитывающие имеющийся в его распоряжении структурно-функциональный резерв СУДН. Например, для схемы определения ориентации (используются только ЧЭ СУДН) можно построить три варианта схемы

функциональной целостности (СФЦ), отличающихся друг от друга расположением одноосных измерителей угловой скорости (ОИУС) [4-8] (см. рисунок 5).

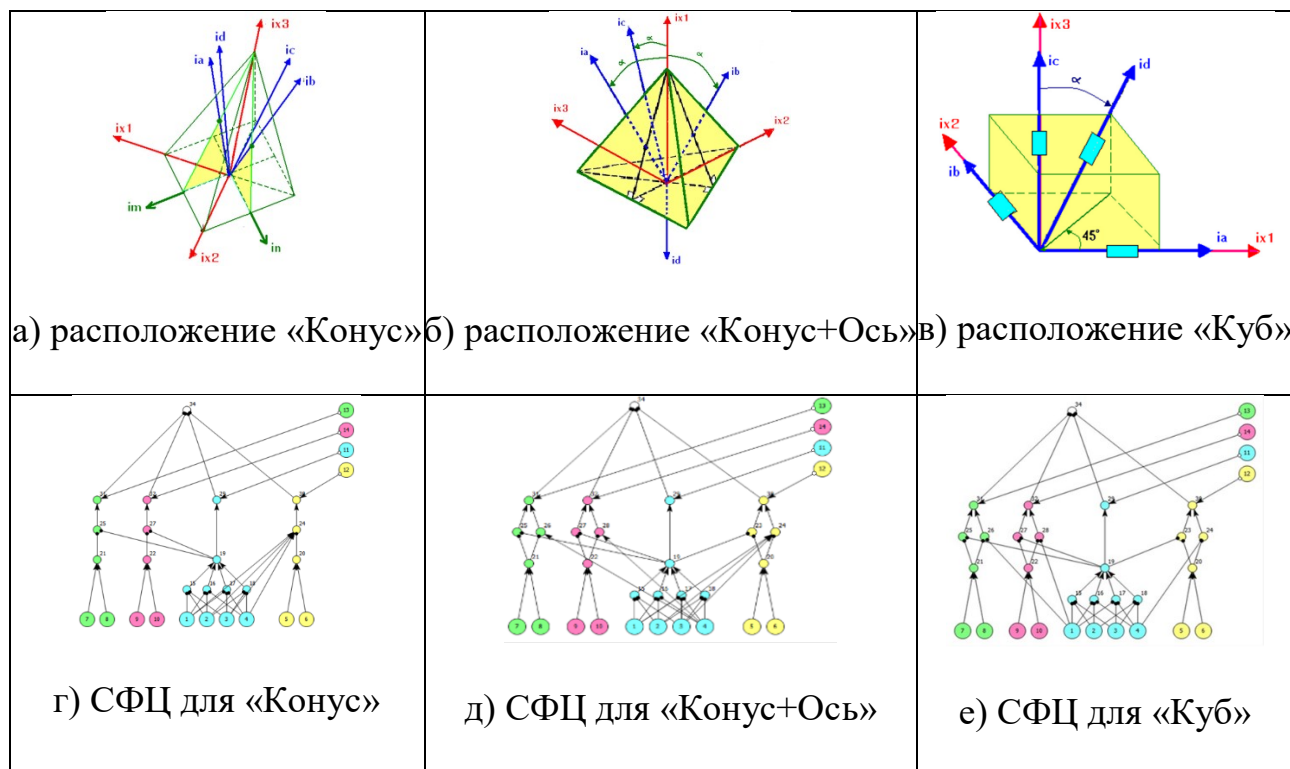


Рис.5 – Схема функциональной целостности определения ориентации СУДН для различных вариантов расположения ОИУС на КА

Также, кроме четырёх ОУИС (на рисунке 5 вершины 1, 2, 3, 4 обозначены бирюзовым цветом) в приведённом примере рассматриваются два оптических солнечных датчика (ОСД) (на рисунке 5 вершины 5, 6 обозначены жёлтым цветом), два звёздных датчика (ЗД) (вершины 9, 10 обозначены розовым цветом) и прибор ориентации на Землю (ПОЗ) (вершины 7,8 обозначены зелёным цветом). В качестве режимов ориентации (см. на рисунках кружки, расположенные вертикально) определены «солнечная» ориентация (СО) (вершина 12), ориентация для ВКИ (вершина 13), режим целевой ориентации (ЦО) (вершина 14) и режим ориентации для СКМ (вершина 11).

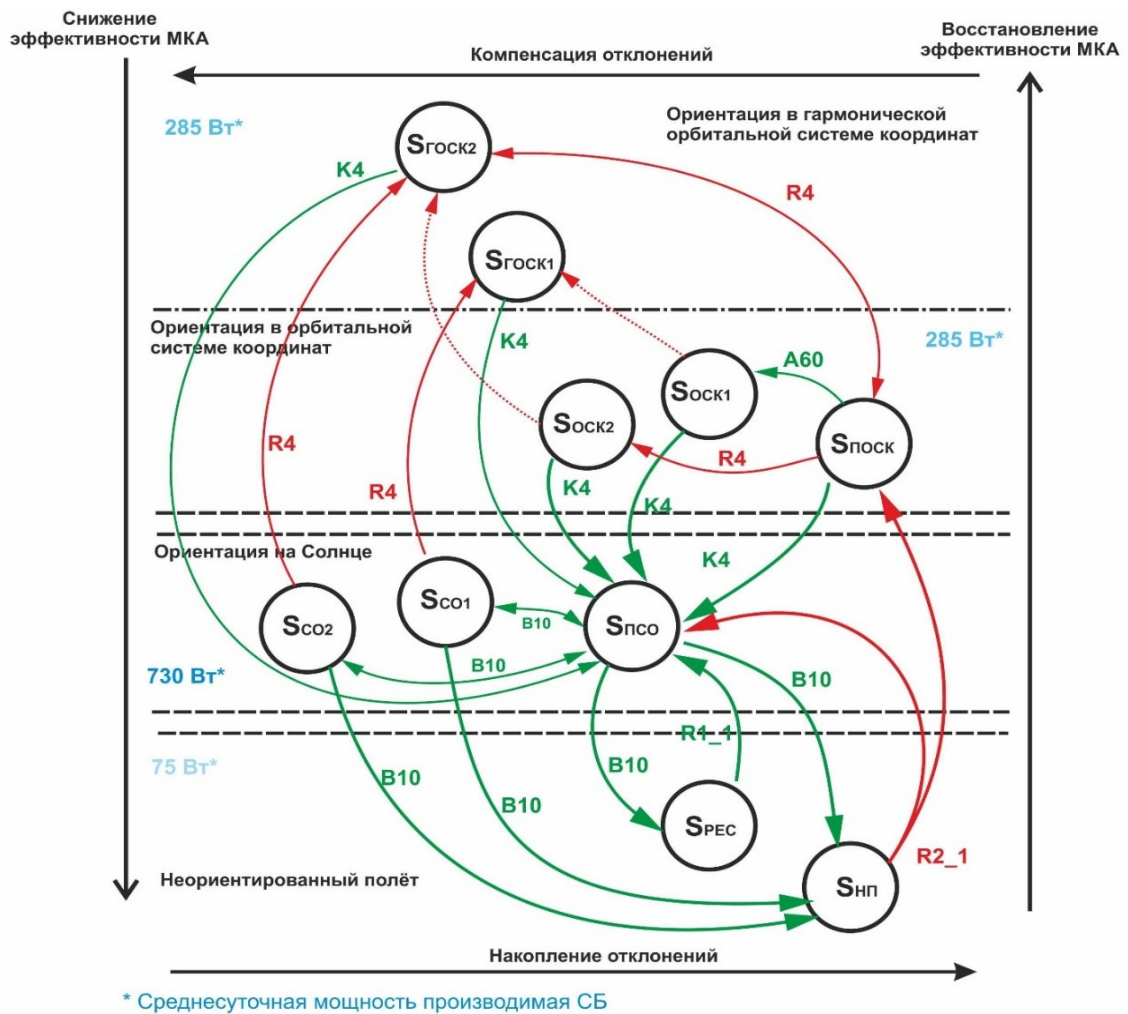
## **Концептуальная модель планирования конфигурирования и реконфигурации СУДН МКА**

Очевидно, для каждой выполняемой функции или набора функций МКА предусматривается определённая рабочая (текущая) конфигурация БА и режим ориентации СУДН МКА.

Рабочая конфигурация БА – это совокупность включенных и используемых при управлении МКА функциональных элементов БА.

Всё множество структурных состояний СУДН МКА ДЗЗ в зависимости от объема выполняемых функций и числа работающих функциональных элементов может быть разделено на работоспособные состояния системы, частично работоспособные состояния и неработоспособные состояния системы.

Рассмотрим схему эволюции работоспособности МКА с учётом режимов ориентации СУДН (см. рисунок 6).



по командам с наземного комплекса управления (НКУ)

→ при получении информации с НКУ

⋯→ автоматически на борту МКА

→ Рис.6 – Схема эволюции работоспособности МКА

Области работоспособности на данной схеме разделены двойной пунктирной линией. То есть, работоспособные состояния – это области, соответствующие ориентации в орбитальной и гармонической орбитальной системе координат, частично работоспособные – область, соответствующая ориентации МКА на Солнце, и область неработоспособных состояний – это неориентированный полёт.

Основные задачи СУДН применительно к данной схеме:

- приведение МКА в солнечную ориентацию ( $S_{\text{ПСО}}$ ) и обеспечение одноосной солнечной ориентации ( $S_{\text{CO1}}, S_{\text{CO2}}$ ) МКА (совмещение оси  $Y_C$  с направлением на Солнце);
- приведение МКА в ориентированное в орбитальной системе координат (ОСК) положение ( $S_{\text{ПОСК}}$ ) и поддержание заданного углового положения в ОСК или гармонической ОСК (ГОСК) ( $S_{\text{ОСК1}}, S_{\text{ОСК2}}, S_{\text{ГОСК1}}, S_{\text{ГОСК2}}$ );
- перевод МКА из солнечной ориентации в ориентацию в ОСК/ГОСК;
- перевод МКА из ориентации в ОСК/ГОСК в солнечную ориентацию.

Программы СУДН, используемые при организации конфигурирования и реконфигурации БС МКА:

A60 – Определение по информации ПОЗ ориентации МКА в ОСК;

B10 – Приведение МКА ДЗЗ в солнечную ориентацию;

K4 – Управление резервами БА СУДН МКА ДЗЗ при возникновении отказов и неисправностей;

R1 – Приведение МКА в ориентированное на Солнце положение;

R2 – Приведение МКА в ориентированное в ОСК положение;

R4 – Ориентация с помощью ОЗД.

В таблице 1 представлен состав используемой и находящейся в резерве БА СУДН в зависимости от состояния МКА.

Из данного примера нетрудно заметить, что каждому структурному состоянию СУДН МКА ДЗЗ соответствует конкретная рабочая конфигурация БА СУДН и текущий режим ориентации, реализуемый СУДН.

При исследовании структурно-функциональных свойств и особенностей СУДН МКА ДЗЗ важно учитывать то, что функционирование МКА в динамически изменяющихся условиях неотрывно связано с постоянным воздействием возмущающих факторов космической среды. Результатом таких воздействий является возникновение отказов и сбоев БА МКА, которые и предопределяют необходимость проведения реконфигурации бортовых систем МКА.

Таблица 1.

## БА СУДН в возможных состояниях МКА

БА СУД	Состояние МКА										
	S <sub>НП</sub>	S <sub>РЕС</sub>	S <sub>ПСО</sub>	S <sub>СО1</sub>	S <sub>СО2</sub>	S <sub>ПОСК</sub>	S <sub>СОК1</sub>	S <sub>СОК2</sub>	S <sub>ГОСК1</sub>	S <sub>ГОСК2</sub>	
4	Неориенти	Рестарт	Работоспособно	Работоспособно	Работоспособно	Работоспособно	Работоспособно	Работоспособно	Работоспособно	Работоспособно	Работоспособно
	рованный полёт.	(перезуаг рузка)	2÷4 УДМ, в контуре	2÷4 УДМ, в контуре	3÷4 УДМ, в контуре	3÷4 УДМ, в контуре	3÷4 УДМ, в контуре	3÷4 УДМ, в контуре	4 УДМ, в контуре	3÷4 УДМ, в контуре	УДМ, в контуре используется 3
УДМ	БА СУДН	СУДН.	используется 2÷3	используется 2÷3	используется 3	используется 3	используется 3	используется 3	используется 3	используется 3	
	3	включение	ниие БА	Работоспособно	Работоспособно	Работоспособно 3	Работоспособно	Работоспособно	Работоспособно	Работоспособно	Работоспособно 3
ЭМ	СУДН по командам	СУДН и свключеникоманд	2÷3 ЭМ, в контуре	2÷3 ЭМ, в контуре	ЭМ, в контуре используется 3	2÷3 ЭМ, в контуре	2÷3 ЭМ, в контуре	3 ЭМ, в контуре используется 3	2÷3 ЭМ, в контуре	ЭМ, в контуре используется 3	
	НКУ	е через несколько	используется 2÷3	используется 2÷3		используется 2÷3	используется 2÷3		используется 2÷3		
2	о		Работоспособно	Работоспособно	Работоспособно	Работоспособно	Работоспособно	Работоспособно	Работоспособно	Работоспособно	
	(десятки секунд.		1÷2 ПОЗ, в контуре не используется	1÷2 ПОЗ, в контуре не используется	1÷2 ПОЗ, в контуре не используется	1÷2 ПОЗ, в контуре используется 1	1÷2 ПОЗ, в контуре используется 1	2 ПОЗ, в контуре используется 1	0÷2 ПОЗ, в контуре не используется	0÷2 ПОЗ, в контуре не используется	
ПОЗ						ПОЗ	ПОЗ	ПОЗ			

Чувствительные элементы Исполнительные органы





При этом *под отказом* будем понимать событие, которое заключается в переходе объекта (БА) из работоспособного состояния в неработоспособное, а *под сбоем* – отказ, устраняющийся автономно на борту, либо посредством несущественного вовлечения оператора.

Тогда при сбоях и отказах БА СУДН МКА возникает необходимость формирования новой структуры контура управления МКА путем задания новой работоспособной конфигурации БА, а также режима функционирования МКА. При этом МКА может либо оставаться в текущей области состояний, либо перейти в другую.

На рисунке 7 представлен процесс перехода некоторой системы из своего исходного структурного состояния  $S_0$  в некоторое финальное состояние  $S_f$  (неработоспособное или частично работоспособное), который будем называть процессом деградации структуры рассматриваемой системы или деградационный процесс (Д-процесс).

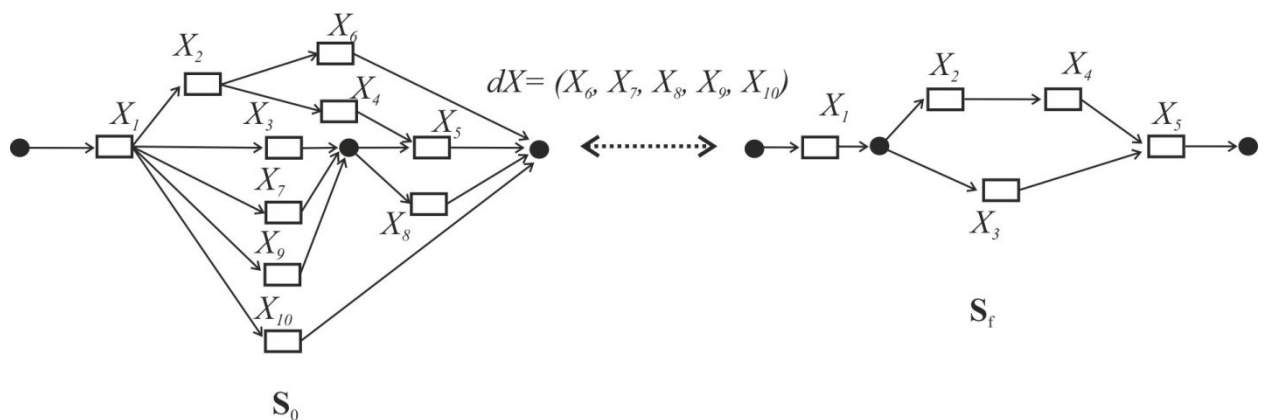


Рис.7 – Процесс смены структурных состояний исследуемой системы

Отметим, что процесс деградации сопровождается отказами БА и, как следствие, разрушением структурных связей между соответствующими элементами

и подсистемами. В связи с этим обозначим множество элементов БА МКА, выходящих из строя, через  $dX = \{X_1, \dots, X_f\}$ . Так как сбои и отказы БА, в результате которых СУДН МКА переходит в частично работоспособное или полностью неработоспособное состояние, носят принципиально стохастический характер, то процесс перехода структуры из  $S_0$  в  $S_f$  может проходить по любому из возможных сценариев. При этом произвольный сценарий (из множества всевозможных сценариев) может быть описан представленной ниже цепочкой:

$$S_0 \xrightarrow{X_1} S_1 \xrightarrow{X_2} \dots S_j \xrightarrow{X_{j+1}} S_{j+1} \dots \xrightarrow{X_{f-1}} S_{f-1} \xrightarrow{X_f} S_f$$

При возникновении неисправности элемента  $X_{j+1}$  осуществляется переход системы из текущего структурного состояния  $S_j$  в некоторое новое структурное состояние  $S_{j+1}$ .

Основными особенностями структурной динамики на борту МКА являются:

- протекание на борту как деградиционных (сбои/отказы), так и восстановительных процессов (В-процессов), заключающихся в восстановлении работоспособности отказавших элемента, либо его замене на резервный. В связи с этим требуется учитывать состояние всей БА при решении задачи синтеза нового структурного состояния  $S_{j+1}$ ;

- каждый из режимов ориентации СУДН МКА может соответствовать либо работоспособному, либо частично работоспособному состоянию системы. Поэтому задействование различных режимов ориентации следует учитывать при формировании новых состояний МКА  $S_{j+1}$ .

Также необходимо отметить, что постоянное изменение характеристик БА МКА, а также непрерывное расходование (сокращение) бортового ресурса (информационного, временного, энергетического) в процессе функционирования накладывает дополнительные трудности при проведении конфигурирования и реконфигурации СУДН МКА.

Как известно, обычно процесс конфигурирования и реконфигурации СУДН МКА осуществляется посредством закладки командно-программной информации средствами НКУ. В этом случае время решения задачи выработки новой структуры системы и выдачу указаний на реконфигурацию СУДН существенно увеличивается в связи с перерывами в сеансах связи МКА с НКУ, человеческим фактором и другими причинами. Кроме того, значительно усложняет процесс выработки и принятия решения необходимость учета ресурсных ограничений и нацеленность на его рациональное использование.

Схематично вывод МКА из нештатной ситуации (НС) с помощью НКУ представлена на рис. 8, где  $t_{сб}$  – момент возникновения НС, заключающейся в сбое или отказе элемента системы, переходе системы из работоспособного в частично работоспособное или из частично работоспособного в неработоспособное состояние;  $(t_0^{CC \text{ №}N}, t_f^{CC \text{ №}N})$  – временной интервал сеанса связи МКА с НКУ, на котором возникшая неисправность обнаруживается и фиксируется (первого сеанса связи после возникновения НС);  $(t_0^{CC \text{ №}N+1}, t_f^{CC \text{ №}N+1})$  – временной интервал сеанса связи МКА с НКУ, в течение которого на борт передаются команды на

реконфигурацию системы с целью устранения НС,  $t_{\text{вост}}$  – момент времени перехода (возвращения) к штатному функционированию МКА.

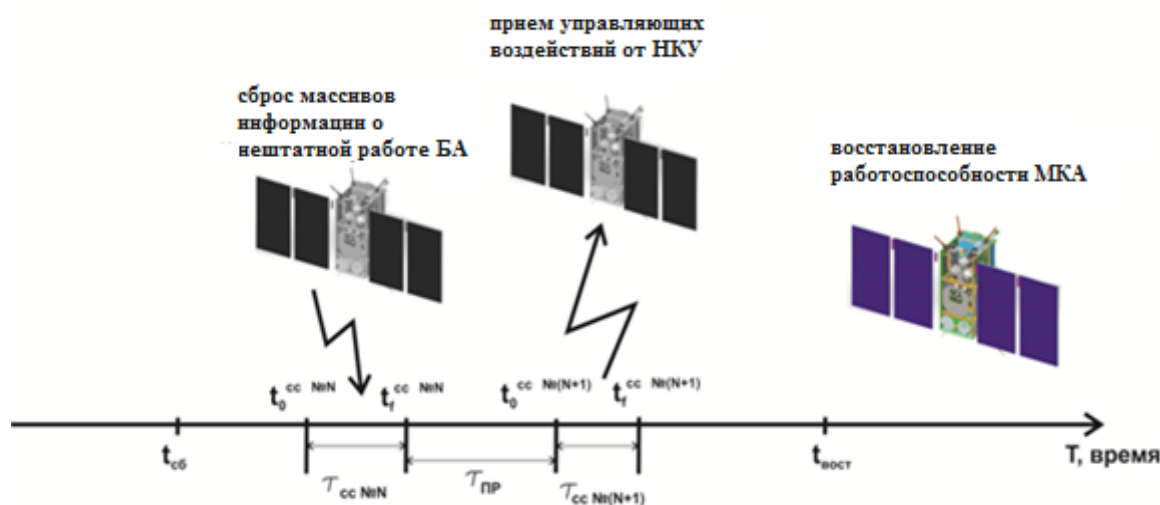


Рис.8 – Вывод МКА из нештатной ситуации средствами НКУ

Важным отличием организации реконфигурации СУДН МКА на борту является отсутствие необходимости текущей связи НКУ с МКА, что позволяет решать данную задачу в любой момент времени сразу после возникновения НС. Это повышает оперативность управления структурной динамикой СУДН МКА, а также снижает нагрузку на оператора (рабочую группу). Таким образом, выделим два типа сценария проведения конфигурирования и реконфигурации: 1-й тип, с использованием средств НКУ, и 2-й тип, автоматически на борту МКА.

В связи с этим возникает необходимость разработки программного и модельно-алгоритмического обеспечения проактивного управления конфигурацией (реконфигурацией) СУДН МКА. *Под конфигурированием СУДН МКА* понимается их плановая перестройка (изменение параметров и/или структур соответствующих аппаратно-программных комплексов (АПК)) для успешного решения задач. При этом задачи могут быть определены заблаговременно перед началом очередного этапа

реализации программы полета МКА либо ситуационно, в режиме реального времени в ходе проведения указанных этапов. Процесс *реконфигурации СУДН МКА*, в свою очередь, заключается в ситуационном изменении их структуры, параметров и технологий функционирования, проводимые для сохранения или восстановления значений конкретных показателей на уровне, не ниже требуемого. Кроме того, целью проведения реконфигурации СУДН может служить обеспечение наименьшего снижения значений показателей (эффективности, живучести, надежности) при деградации системы.

Наконец, *под планированием конфигурирования и реконфигурации СУДН МКА* будем понимать процессы формирования последовательности целевых и обеспечивающих операций, выполняемых с целью изменения рабочей конфигурации БА и выбора следующих режимов ориентации СУДН, а именно:

- формирование рабочей конфигурации БА, а также выбор режима ориентации СУДН МКА;
- выдача рабочей программы на борт МКА, если конфигурирование и реконфигурация проходят с привлечением НКУ;
- реализация выдачи команд на включение/выключение БА в соответствии с заданной рабочей конфигурацией и смена режима ориентации СУДН при необходимости.

Кроме того, необходимо учитывать, что задействование режимов функционирования СУДН МКА существенным образом сказываются на вероятности успешного функционирования её подсистем и всей системы в целом. При этом режимы могут отличаться как с точки зрения интенсивности их использования, так и

с точки зрения совместности – некоторые или все режимы могут быть основными и выполняться только последовательно (несовместно), тогда как отдельные режимы могут являться вспомогательными и выполняться параллельно (совместно) с основными режимами.

На основании вышеизложенного описания процессов функционирования СУДН МКА *суть задачи планирования конфигурации и реконфигурации СУДН МКА* сводится к следующему:

*известно:* режимы ориентации СУДН, приборный состав БА СУДН, имеющийся бортовой ресурс, а также задачи, выполняемые МКА.

*требуется найти:* последовательность рабочих конфигураций БА для обеспечения функционирования СУДН МКА с наилучшим качеством с точки зрения заданных критериев в условиях заданной или неизвестной циклограммы режимов ориентации.

Задача планирования *конфигурации и реконфигурации СУДН МКА* усложняется в условиях неизвестной циклограммы функционирования МКА и задействования соответствующих режимов ориентации СУДН.

### **Обобщенная формальная постановка задачи планирования конфигурирования и реконфигурации СУДН МКА**

Для формального описания поставленной задачи введем следующие базисные множества:

$\Theta = \{\Theta_s, s = 1, \dots, Z\}$  – множество функций МКА, определяемых его целевым применением;

$A = \{A_i, i \in N\}, N = \{1, 2, 3, \dots, n\}$  – множество элементов бортовой аппаратуры СУДН МКА;

$Q = \{Q_y^s, s = 1, \dots, Z, y = 1, \dots, Y^s\}$  – множество режимов ориентации СУДН МКА, обеспечивающих выполнение функций МКА;

$\Phi = \{\Phi_{\pi}^{iy}, \pi = 1, \dots, \mathcal{P}^i\}$  – множество функций, реализуемых бортовой аппаратурой при работе в заданном режиме ориентации СУДН МКА;

$W = \{W_k, k = 1, \dots, \Psi\}$  – множество различных ресурсов МКА, которые обеспечивают работу его БА и функционирование МКА в целом.

На основе введенных базисных множеств определим системный динамический альтернативный мультиграф (ДАМГ) вида (1):

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

где  $\chi = \overline{1, 3}$  – индекс, отражающий тип структуры управления МКА;

$G_1^t = \langle X_1^t, \Gamma_1^t \rangle$  – технологическая структура управления МКА с учетом различных вариантов его функционирования,  $X_1^t$  – множество вершин указанного графа, которые обозначают режимы ориентации СУДН МКА,  $\Gamma_1^t$  – множество ребер графа, отражающих взаимосвязь режимов ориентации СУДН, а также последовательность их задействования;

$G_2^t = \langle X_2^t, \Gamma_2^t \rangle$  – техническая структура СУДН МКА с учетом возможных вариантов рабочей конфигурации БА для заданных режимов ориентации СУДН МКА,  $X_2^t$  – множество вершин указанного графа, отражающих БА СУДН МКА,  $\Gamma_2^t$  –

множество ребер графа, определяющих варианты взаимодействия БА для реализации указанных режимов ориентации СУДН МКА;

$G_3^t = \langle X_3^t, \Gamma_3^t \rangle$  – функциональная структура режимов ориентации СУДН МКА с учетом возможных вариантов реализации функций БА, реализуемых при работе в заданном режиме ориентации СУДН,  $X_3^t$  – множество вершин указанного графа, отражающих функции БА,  $\Gamma_3^t$  – множество ребер графа, описывающих взаимосвязь и последовательность выполнения функции БА для реализации заданных режимов ориентации СУДН МКА;

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

На основании концептуальной постановки решаемой задачи зададим множество допустимых отображений описанных выше графов друг на друга:

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

Таким образом, подмножество декартова произведения множеств элементов, на которых строятся технологическая, техническая и функциональная структуры:  $S_\delta \subseteq X_1^t \times X_2^t \times X_3^t$ ,  $\delta = 1, \dots, K_\Delta$ , будет описывать структурное состояние СУДН МКА в некоторый момент времени  $t$ .

Считая, что каждое структурное состояние системы в любой момент  $t$  есть результат композиции соответствующих мультиграфов, описывающих тип структуры, зададим множество допустимых отображений многоструктурных состояний СУДН МКА друг на друга:

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



Справедливо допустить, что структурное макросостояние СУДН МКА остается неизменным в течение некоторого промежутка времени. Изменение макросостояния может происходить:

- автоматически на борту МКА при парировании нештатной ситуации;
- принудительно, по инициативе НКУ.

Предполагается, что существуют интервалы постоянства структур СУДН МКА. Каждому такому интервалу  $(t_\delta, t_{\delta+1}]$  может быть поставлено в соответствие определенное структурное состояние СУДН МКА  $S_\delta \in S = \{S_1, \dots, S_{K_\Delta}\}$ . Тогда структурную динамику СУДН МКА с учётом проведения конфигурирования и реконфигурации СУДН МКА  $\Upsilon^{tf}$  можно интерпретировать как последовательность (композицию) выполнения операций отображения (см. формулу (3)) во времени  $\Upsilon^{tf} = \Pi_{\langle \delta, \delta_1 \rangle}^{t_1} \circ \Pi_{\langle \delta_1, \delta_2 \rangle}^{t_2} \circ \dots \circ \Pi_{\langle \delta', \delta' \rangle}^{t_f}$ , при которой обеспечиваются требуемые значения показателей эффективности функционирования МКА.

Таким образом, формально весь процесс функционирования СУДН МКА может быть представлен как поиск наиболее предпочтительной последовательности проведения конфигурирования и реконфигурации СУДН МКА  $\Upsilon_*^{tf}$ :

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

$$\Delta_g = \{\Upsilon^{tf} | \Upsilon^{tf} = \Pi_{\langle \delta, \delta_1 \rangle}^{t_1} \circ \Pi_{\langle \delta_1, \delta_2 \rangle}^{t_2} \circ \dots \circ \Pi_{\langle \delta', \delta' \rangle}^{t_f}; W_k(X_{\chi}^t, \Gamma_{\chi}^t, L_{\langle \chi, \chi' \rangle}^t, \Pi_{\langle \delta, \delta' \rangle}^t) \leq W_k^{зад}; k = \overline{1, \Psi}\}, \quad (5)$$

где  $\mathfrak{Z}$  – показатель или набор показателей, характеризующих качество функционирования СУДН МКА,  $\tilde{W}_k$  – заданные значения имеющегося бортового

ресурса,  $\Delta_g$  – множество допустимых вариантов проведения конфигурирования и реконфигурации СУДН МКА, удовлетворяющих ограничениям на бортовые ресурсы.

Возникновение ситуаций, связанных с динамикой структур СУДН, вызвано появлением нештатной ситуации из-за сбоев (или отказов) БА МКА, а также выполнением полетного задания. Такие ситуации сопровождаются переходом из текущего структурного состояния  $S_\delta$  в новое структурное состояние  $S_{\delta+1}$  МКА.

Далее будем предполагать, что при превышении суммарной наработки прибора заданного временного ресурса БА (либо уменьшения вероятности безотказной работы ниже заданной величины) вероятность отказа, после которого прибор уже не подлежит дальнейшему восстановлению, многократно возрастает (хотя сам прибор по-прежнему может находиться в работоспособном состоянии). Для упрощения будем считать БА отказавшей, если оно исчерпало временной ресурс либо вероятность отказа больше заданной величины.

При моделировании отказов БА в зависимости от наработки на отказ будем пользоваться следующей формулой:

$$s_i(t) = \begin{cases} 0, & p_i(t) \leq p_i^{\text{зад}} \\ 1, & \text{в противном случае} \end{cases}, \quad (5)$$

где  $s_i(t) = 0$  соответствует неработоспособному состоянию  $i$ -го функционального элемента (ФЭ) СУДН МКА, а  $s_i(t) = 1$  – работоспособному,  $p_i(t)$  – вероятность безотказной работы  $i$ -го ФЭ СУДН МКА. Величины  $p_i^{\text{зад}}$  задаются как исходный данные, полученные в результате анализа эксплуатации аналогичных ФЭ на различных МКА.

Возникновение ситуаций, связанных со структурной динамикой СУДН МКА, может быть вызвано не только сбоями (или отказами) БА. Кроме появления сбоев (или отказов) изменение технической структуры СУДН осуществляется при плановой смене режимов ориентации МКА. При этом необходимо выработать решение для дальнейшей эксплуатации МКА, то есть осуществить синтез нового структурного состояния СУДН (провести реконфигурацию БА).

Анализируя технологию *«слепой» (классической) реконфигурации*, суть которой заключается в отказе от менее приоритетных функций системы при возникновении неисправностей в пользу сохранения или восстановления более значимых функций СУДН, важно отметить, что операции оценивания целевых возможностей СУДН, учета и анализа её функций и текущих характеристик решаемых ею задач, а также анализ и оценивание текущего состояния системы в целом не проводится. Это существенным образом снижает возможную эффективность проведения реконфигурации СУДН МКА.

Учитывая вышесказанное, предлагается рассматривать реконфигурацию таких сложных многорежимных объектов, как СУДН МКА, не только как технологию управления с целью повышения живучести и надежности функционирования СУДН МКА, но и в качестве способа проактивной (заблаговременной) реакции на возможные отказы БА. Предлагаемый вариант реконфигурации будем называть *структурно-функциональной*.

Для проведения структурно-функциональной реконфигурации БА при возникновении сбоев (отказов) или смене режима ориентации МКА в условиях

заданной или неизвестной циклограммы режимов ориентации требуется решить задачу выбора варианта рабочей конфигурации БА СУДН МКА.

## **Аналитическая модель выбора варианта рабочей конфигурации БА СУДН МКА**

Рассмотрим некоторый подынтервал времени  $(t_\delta, t_{\delta+1}]$ . Требуется выбрать текущее структурное состояние  $S_{\delta+1}$  - рабочую конфигурацию БА СУДН МКА ДЗЗ в условиях как заданной, так и неизвестной циклограммы режимов ориентации СУДН. Для формализации решаемой задачи, используя теоретико-множественный подход [17], определим основные множества её элементов и характеристик [18]:

$A = \{A_i, i \in N\}, N = \{1, 2, 3, \dots, n\}$  – множество элементов БА СУДН МКА;

$c_i, i \in N$  – энергопотребление ФЭ МКА на интервале  $(t_\delta, t_{\delta+1}]$ ;

$p_i, i \in N$  – вероятность безотказной работы  $i$ -го ФЭ МКА на интервале  $(t_\delta, t_{\delta+1}]$ ;

Для исследования структурно-функциональной надежности СУДН МКА целесообразно использовать возможности общего логико-вероятностного метода (ОЛВМ) для построения СФЦ СУДН МКА и вычисления

$\mathfrak{R}(P_1, \dots, P_n, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$  –вероятностной функции (ВФ) безотказной работы (успешного функционирования) СУДН МКА по реализации режимов ориентации. Следует отметить при этом, что в получаемой с помощью ОЛВМ ВФ учтены мажоритарное резервирование и совместность задействования режимов функционирования [11,14,19]. Зная указанную выше ВФ, осуществляется вычисление

[11,14,19]  $\vec{\chi}(\alpha_1, \dots, \alpha_m) = (\chi_0(\alpha_1, \dots, \alpha_m), \chi_1(\alpha_1, \dots, \alpha_m), \dots, \chi_n(\alpha_1, \dots, \alpha_m))^T$  - параметрического генома структуры СУДН МКА по реализации режимов ориентации, представляющего собой вектор коэффициентов вероятностного полинома успешного функционирования системы и позволяющий исследовать её структурно-топологические свойства и вычислять надежность реализации режимов ориентации СУДН МКА при заданной и неизвестной циклограмме их задействия. Здесь  $\alpha_l, l \in \{1, \dots, m\}$  - интенсивности востребования (задействия) режимов ориентации СУДН МКА.

Через вектор  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$  будем обозначать вариант рабочей конфигурации СУДН МКА. Здесь  $x_i = 1$  в случае использования  $A_i$  ФЭ в конфигурации, и  $x_i = 0$ , в противном случае.

При решении задачи выбора рабочей конфигурации СУДН МКА возникает необходимость рассмотрения двух частных случаев:

**I:** детерминированный: заданы интенсивности задействия режимов ориентации СУДН, а их совместность учтена при построении ВФ [20];

**II:** недетерминированный: интенсивности задействия режимов ориентации, а также их совместность полностью неизвестны [11-14].

*Случай I* характеризуется значительным объемом априорной информации о задействовании режимов ориентации системы на этапе формирования конфигурации. При этом показателем надежности реализации режимов ориентации СУДН МКА может выступать целевая функция  $P_o(X) = \Re(p_1 \cdot s_1 \cdot x_1, p_2 \cdot s_2 \cdot x_2, \dots, p_n \cdot s_n \cdot x_n, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$ .

*Случай II* отражает отсутствие достаточного объема информации, характеризуется неизвестной циклограммой задействия режимов ориентации

СУДН, в условиях которой необходимо решить задачу выбора рабочей конфигурации. В связи с этим целесообразно исследовать следующие крайние частные варианты задействования режимов:

- раздельно, с одинаковой или разной интенсивностью;
- совместно, так же с одинаковой или разной интенсивностью [11-14].

ВФ  $\mathfrak{R}_{pc}(P_1, \dots, P_n, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$  представляет собой полином, зависящий от вероятностей безотказной работы каждого из ФЭ системы, а также вероятностей (интенсивностей) задействования каждого из режимов функционирования. ВФ получаем с помощью программного комплекса логико-вероятностного моделирования «Арбитр» на основании построенной схемы функциональной целостности (СФЦ) исследуемой системы [9]. Тогда в качестве целевых функций надежности реализации режимов

ориентации СУДН МКА будем использовать либо

$$P_{pp}(X) = m \cdot \int_0^{1/m} \mathfrak{R}_{pp}(p_1 \cdot s_1 \cdot x_1, p_2 \cdot s_2 \cdot x_2, \dots, p_n \cdot s_n \cdot x_n, \alpha) d\alpha, \text{ если все режимы задействуются раздельно}$$

с одинаковой интенсивностью (равноценные режимы), либо

$$P_{cp}(X) = \int_0^1 \mathfrak{R}_{cp}(p_1 \cdot s_1 \cdot x_1, p_2 \cdot s_2 \cdot x_2, \dots, p_n \cdot s_n \cdot x_n, \alpha) d\alpha \text{ при совместном задействовании всех режимов}$$

так же с одинаковой интенсивностью. В случае различной интенсивности задействования режимов ориентации (неравноценные режимы) целевой функцией надежности [20] успешного функционирования системы будет выступать либо

$$P_{pn}(X) = m! \cdot \iiint_{\substack{\alpha_1 + \dots + \alpha_m \leq 1 \\ 0 \leq \alpha_i \leq 1, i=1, \dots, m}} \mathfrak{R}_{pn}(p_1 \cdot s_1 \cdot x_1, p_2 \cdot s_2 \cdot x_2, \dots, p_n \cdot s_n \cdot x_n, \alpha_1, \dots, \alpha_m) d\alpha_1 \dots d\alpha_m \text{ при раздельном}$$

задействовании всех режимов, либо

$$P_{cn}(X) = \int_0^1 \int_0^1 \dots \int_0^1 \mathfrak{R}_{cn}(p_1 \cdot s_1 \cdot x_1, p_2 \cdot s_2 \cdot x_2, \dots, p_n \cdot s_n \cdot x_n, \alpha_1, \dots, \alpha_m) d\alpha_1 \dots d\alpha_m \quad \text{при совместном их}$$

задействовании.

Предложенные целевые функции надежности реализации режимов ориентации СУДН МКА для второго частного случая ( $P_{pp}(X), P_{cp}(X), P_{pn}(X), P_{cn}(X)$ ) позволяют оценить крайние варианты задействования режимов, т.е. дать в некотором смысле пессимистические и оптимистические оценки показателей надежности [11-14].

В качестве целевых функций учета ресурсных требований к конфигурации используем  $C(X) = \sum_{i=1}^n c_i \cdot x_i$  - энергопотребление СУД МКА.

Следует отметить, что область  $\Delta$  допустимых вариантов конфигурации СУДН МКА имеет следующий вид:  $\Delta = \{(x_1, x_2, \dots, x_n)^T \mid x_i \in \{0, 1\}, i = \overline{1, n}\}$ .

Наконец, еще одной важной особенностью конфигурирования и реконфигурации СУДН МКА ДЗЗ для улучшения общего целевого эффекта на максимально возможном интервале времени его активного функционирования является направленность на равномерную функциональную загрузку ФЭ и подсистем при смене конфигураций СУДН, что гарантирует ее высокую надежность и живучесть.

Поэтому при планировании конфигурации и реконфигурации многорежимного СУДН МКА ДЗЗ в условиях заданной или неизвестной циклограммы режимов функционирования требуется решить задачу выбора рабочей конфигурации ФЭ СУДН МКА ДЗЗ с учетом указанной особенности.

Таким образом, задача выбора рабочей конфигурации СУДН МКА с учетом указанных выше особенностей и ограничений заключается в решении следующих многокритериальных задач выбора [11-14].

Для первого частного случая

$$\min_{X \in \Delta} C(X), \max_{X \in \Delta} P_0(X), \quad (6)$$

Для второго частного случая

$$\min_{X \in \Delta} C(X), \max_{X \in \Delta} P_{pp}(X), \max_{X \in \Delta} P_{cp}(X), \max_{X \in \Delta} P_{pn}(X), \max_{X \in \Delta} P_{cn}(X) \quad (5)$$

Иначе говоря, суть представленного подхода заключается в поиске недоминируемых (паретовских) вариантов конфигурации СУДН МКА  $\Delta^{nd} \subseteq \Delta$ , удовлетворяющих следующим требованиям: минимальное энергопотребление СУДН МКА и, вместе с тем, обеспечение максимальной надежности функционирования СУДН МКА для двух рассматриваемых случаев: детерминированный и недетерминированный.

### **Результаты вычислительного эксперимента планирования конфигурирования и реконфигурации СУДН МКА ДЗЗ**

Для приведенных выше режимов ориентации СУДН МКА рассмотрим штатные алгоритмы. Штатная схема режима СКМ для МКА «Аист-2Д» использует в качестве чувствительных элементов (ЧЭ) ОИУС, при этом для нахождения вектора угловой скорости достаточно измерений трёх любых ОИУС [1-3]. Для штатного режима одноосной СО также используются три любых ОИУС и один любой ОСД. Трехосная



ориентация для ВКИ осуществляется с помощью трёх любых ОИУС и ПОЗ. Режим ЦО соответственно заключается в определении ориентации с помощью ЗД.

Практика эксплуатации МКА показывает, что помимо штатных алгоритмов определения ориентации разработчики бортовых систем также используют аварийные (нештатные, «байпасные») алгоритмы [4,5].

В статье [6] наряду с основной схемой ориентации с использованием ЗД была предложена контрольно-резервная схема определения ориентации (КРСОО), основанная на ПОЗ для повышения сбоеустойчивости МКА. Ориентация МКА для ВКИ даёт возможность: ЗД определять ориентацию в условиях допустимого диапазона по угловым скоростям, планировать засветки датчиков Солнцем (Луной) при наличии информации о положении центра масс. Тем самым поддерживается функция высокоточного определения ориентации ЗД. Согласно результатам работы [6], КРСОО может работать при одном ОИУС в канале крена.

Составим таблицу задействования БА в каждом режиме учитывая описанные выше штатные и нештатные алгоритмы ориентации МКА.

Таблица 2.

Соответствие ЧЭ СУДН и режимов ориентации СУДН МКА

ЧЭ СУДН	Алгоритмы ориентации для режимов функционирования МКА						
	СКМ	СО		ВКИ		ЦО	
		Штатная	Нештатная	Штатная	КРСОО[6]	Штатная	КРСОО[6]
ОИУС	3 из 4х	3 из 4х	1 из 4х [3]	3 из 4х	1 (канал крена)	3 из 4х	1 (канал крена)
ОСД	-	1 из 2х	1 из 2х	-	-	-	-

ПОЗ	-	-	-	1 из 2х	1 из 2х	-	1 из 2х
ЗД	-	-	-	-	-	1 из 2х	1 из 2х

Далее более подробно рассмотрим одну из СФЦ, приведённую на рисунке 9, для расположения ОИУС «Куб» (рисунок 6).

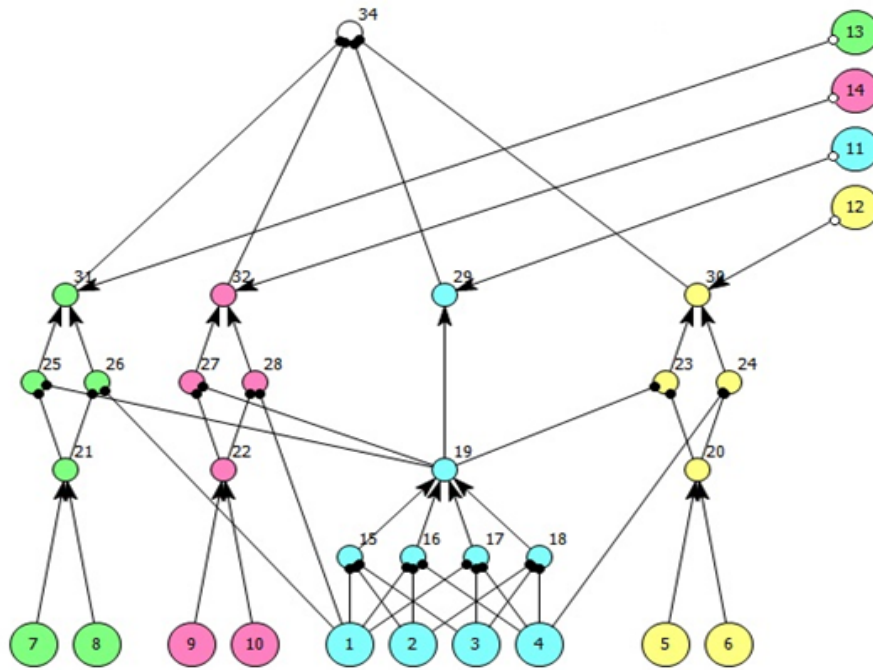


Рис.9 – СФЦ режимов ориентации СУДН МКА для расположения ОИУС «Куб»

Поясним представленную СФЦ. Вершины 1, 2, 3 и 4 отражают работоспособность ОИУС1, ОИУС2, ОИУС3 и ОИУС4 соответственно, вершины 5 и 6- работоспособность ОСД1 и ОСД2 соответственно, вершины 7 и 8 - работоспособность ПОЗ1 и ПОЗ2 соответственно, вершины 9 и 10- работоспособность ЗД1 и ЗД2 соответственно; вершина 11-потребность в режиме СКМ; вершина 12-потребность в режиме СО; вершина 13-потребность в режиме ВКИ; вершина 14-потребность в режиме ЦО. Вершины 15-34 являются фиктивными и описывают реальные логические взаимосвязи элементов СУДН МКА.

Режимы ориентации СУДН рассматриваемого выше МКА ДЗЗ  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_4$  отличаются как с точки зрения характера их использования, так и интенсивности применения.

Так, режимы  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  являются несовместными (т.е. используются поочередно). Четвертый режим  $R_4$ , обеспечивающий коррекцию высоты и наклона орбиты, является дополнительным и может использоваться одновременно, например, с режимом  $R_2$ . Режим  $R_3$  носит регулярный и детерминированный характер. Это определяется известным заранее процессом движения МКА по орбите. Режимы  $R_1$ ,  $R_2$ , и  $R_4$  вводятся в случае необходимости, которая носит принципиально случайный характер. Поэтому предсказать использование данных режимов на некотором временном интервале можно лишь с некоторой вероятностью. Отличия с точки зрения интенсивности их задействования состоят либо в различных долях времени нахождения в режимах ориентации на заданном интервале времени, либо в различных значениях вероятности использования на заданном интервале времени.

При этом некоторые ФЭ (ИО и ЧЭ) СУДН МКА ДЗЗ используются только при работе в одном из режимов, в то время как существуют ФЭ общие для нескольких режимов ориентации СУДН МКА.

Исходные данные:

1. На начальный момент времени вероятность безотказной работы (ВБР) ФЭ представлена в таблице 4.

*Таблица 4*

ВБР ФЭ МКА на начальный момент времени

<b>ФЭ1</b>	<b>ФЭ2</b>	<b>ФЭ3</b>	<b>ФЭ4</b>	<b>ФЭ5</b>	<b>ФЭ6</b>	<b>ФЭ7</b>	<b>ФЭ8</b>	<b>ФЭ9</b>	<b>ФЭ10</b>
<b>ОИУС1</b>	<b>ОИУС2</b>	<b>ОИУС3</b>	<b>ОИУС4</b>	<b>ОСД1</b>	<b>ОСД2</b>	<b>ПОЗ1</b>	<b>ПОЗ2</b>	<b>ЗД1</b>	<b>ЗД2</b>
0,955	0,955	0,973	0,973	0,973	0,973	0,957	0,957	0,95	0,993

2. Будем предполагать, что снижение ВБР по всем ФЭ СУД МКА за некоторые условно заданные интервалы времени будет одинаково и равно значениям, представленным в таблице 5.

Таблица 5

Равномерное снижение ВБР по всем ФЭ МКА

<b>№ интервала</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>ВБР</b>	0,18	0,33	0,55	0,70	0,82	0,86	0,91	0,94	0,96	0,98

3. При моделировании сбоев БА в зависимости от наработки на отказ будем пользоваться следующей формулой:

$$s_i(t) = \begin{cases} 0, & p_i(t) \leq p_i^{\text{зад}} \\ 1, & \text{в противном случае} \end{cases}, p_i^{\text{зад}} = 0.15, i = 1, \dots, 10.$$

4. Энергопотребление ФЭ СУДН МКА на каждом интервале заданы в таблице 6

Таблица 6

Энергопотребление (Вт) ФЭ МКА на каждом интервале времени

<b>ФЭ1</b>	<b>ФЭ2</b>	<b>ФЭ3</b>	<b>ФЭ4</b>	<b>ФЭ5</b>	<b>ФЭ6</b>	<b>ФЭ7</b>	<b>ФЭ8</b>	<b>ФЭ9</b>	<b>ФЭ10</b>
<b>ОИУС1</b>	<b>ОИУС2</b>	<b>ОИУС3</b>	<b>ОИУС4</b>	<b>ОСД1</b>	<b>ОСД2</b>	<b>ПОЗ1</b>	<b>ПОЗ2</b>	<b>ЗД1</b>	<b>ЗД2</b>
<b>11,0</b>	<b>11,0</b>	<b>15,0</b>	<b>15,0</b>	<b>15,0</b>	<b>15,0</b>	<b>4,5</b>	<b>4,5</b>	<b>16,5</b>	<b>52,0</b>

5. Энергоресурс на каждом интервале равен 115 Вт.

Проведя вычислительные эксперименты с использованием технологии «слепой» и структурно-функциональной реконфигурации, были получены следующие результаты, представленные в таблицах 7-12. Первые два столбца являются общими (одинаковыми) для всех указанных таблиц: интервал времени, на котором структура исследуемой системы и вычисляемые показатели считаются постоянными, и вариант конфигурации для каждого из интервалов времени, представленный набором чисел - порядковых номеров ФЭ, задействованных в данной конфигурации СУДН МКА.

В таблице 7 представлен план реконфигурации – последовательность рабочих конфигураций СУДН МКА, полученная с использованием технологии структурно-функциональной реконфигурации, а также отражены значения показателей вероятности безотказной работы на каждом интервале времени при различных вариантах задействования – раздельном (несовместном, когда в любой момент времени может быть задействован только один из режимов функционирования. При таком варианте режимы последовательно сменяют друг друга) либо совместном (параллельном) задействовании равноценных и неравноценных режимов ориентации, затраты энергетических ресурсов.

*Таблица 7*

Значения ВБР и энергозатрат СУДН МКА при совместном и раздельном задействовании режимов ориентации для сценария структурно-функциональной реконфигурации

**СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ РЕКОНФИГУРАЦИЯ**

Интервал	Вариант конфигурации	ГНС равноценные	ГНС неравноц.	БезГНС равноценные	БезГНС неравноц.	Затраты энергии
1 интервал	1-2-3-6-7-9	0,893006	0,893006	0,83317	0,844394	73
2 интервал	2-3-4-5-8-10	0,552324	0,552324	0,482825	0,487384	112,5
3 интервал	1-2-4-6-7-9	0,638731	0,638731	0,432866	0,46752	73
4 интервал	1-3-4-6-7-9	0,420576	0,420576	0,224326	0,25037	77
5 интервал	2-3-4-5-8-10	0,294792	0,294792	0,19075	0,20213	112,5
6 интервал	1-2-3-6-7-9	0,238824	0,238824	0,098169	0,111165	73
7 интервал	1-3-4-6-7-9	0,053616	0,053616	0,015092	0,016824	77
8 интервал	4-5-6	0,026684	0,026684	0,006671	0,007116	45

В таблице 8 аналогично на каждом интервале постоянства системы получены интегральные оценки вероятности безотказной работы выбранной конфигурации при задействовании каждого из режимов в отдельности и всех режимов в целом. Например, из таблицы видно, что на последнем (восьмом) временном интервале активного существования МКА возможна реализация только второго режима  $R_2$  СО, в то время как остальные режимы не могут быть задействованы из-за отсутствия требуемых работоспособных элементов.

Таблица 8

Значения вероятности выполнения отдельного режима ориентации СУДН МКА и всех режимов в целом для сценария структурно-функциональной реконфигурации

СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ РЕКОНФИГУРАЦИЯ						
Интервал	Вариант конфигурации	Все режимы ориентации	1 режим СКМ	2 режим СО	3 режим ВКИ	4 режим ЦО

1 интервал	1-2-3-6-7-9	0,784996945	0,8874	0,863441	0,913935	0,90725
2 интервал	2-3-4-5-8-10	0,450632078	0,487358	0,771589	0,466402	0,483946
3 интервал	1-2-4-6-7-9	0,277268911	0,584408	0,771589	0,602175	0,59675
4 интервал	1-3-4-6-7-9	0,198241864	0,393031	0,509899	0,391875	0,3875
5 интервал	2-3-4-5-8-10	0,129445428	0,258406	0,509899	0,200781	0,210084
6 интервал	1-2-3-6-7-9	0,026763667	0,107072	0,068847	0,391875	0,3875
7 интервал	1-3-4-6-7-9	0,000186823	0,010651	0,074529	0,065535	0,06375
8 интервал	4-5-6	0	0	0,106736	0	0

Для оценки эффективности каждого из полученных вариантов конфигурации СУДН МКА предлагается ввести обобщенную оценку его надежности в виде нечеткого трапецевидного числа с параметрами  $Z = (z_1, z_2, z_3, z_4)$ , функция принадлежности которого задается следующим образом (8):

$$\mu_Z(x) = \begin{cases} \frac{x - z_1}{z_2 - z_1}, & \text{если } z_1 \leq x \leq z_2 \\ 1, & \text{если } z_2 \leq x \leq z_3 \\ \frac{z_4 - x}{z_4 - z_3}, & \text{если } z_3 \leq x \leq z_4 \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (8)$$

Для нахождения параметров нечеткого числа  $Z = (z_1, z_2, z_3, z_4)$  будем использовать полученные значения показателей  $P_o(X), P_{pp}(X), P_{cp}(X), P_{pn}(X), P_{cn}(X)$  - вероятностей безотказной работы СУДН в различных условиях задействования режимов ориентации. В качестве параметра  $z_1$  (пессимистическая оценка) будет служить нижняя оценка надежности СУДН, которая вычисляется при условии совместного задействования равноценных по интенсивности режимов функционирования,

используемых максимально на всем рассматриваемом интервале времени. Два других параметра  $z_2, z_3$  выбираются как минимальное и максимальное значения среди показателей надежности при задействовании несовместных равноценных и несовместных неравноценных режимов ориентации СУДН МКА. Наконец, параметр  $z_4$  определяется надежностью системы, функционирующей при несовместном задействовании равноценных по интенсивности режимов. Такой вариант задействования можно считать оптимистическим.

Для однозначного сравнения получаемых вариантов конфигураций системы предлагается принять в качестве обобщенного показателя надежности центр тяжести (центроид, показатель дефаззификации) полученного трапециевидного числа, который определяется выражением (9)

$$C_{тяж} = \frac{(z_3 - z_1)^2 + (z_4 - z_1) * (z_4 - z_3) - \frac{1}{3} * (z_2 - z_1)^2 - \frac{2}{3} * (z_4 - z_3)^2}{z_3 - z_2 + z_4 - z_1} + z_1 \quad (9)$$

где  $z_1, z_2, z_3, z_4$  – описанные выше параметры трапеции.

Результаты вычисления параметров нечеткого трапециевидного числа (вершин трапеции), а также центров тяжести полученных трапеций, характеризующих надежности вариантов конфигурации СУДН МКА, полученных при использовании структурно-функциональной реконфигурации представлены в таблице 9.

*Таблица 9*



Значения обобщенного показателя ВБР СУДН МКА в виде нечеткого числа и показателя дефазификации для сценария структурно-функциональной реконфигурации

<b>СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ РЕКОНФИГУРАЦИЯ</b>						
Интервал	Вариант конфигурации	Трапециевидное нечеткое число				Центр тяжести
1 интервал	1-2-3-6-7-9	0,784997	0,83317	0,844394	0,893006	0,838921686
2 интервал	2-3-4-5-8-10	0,450632	0,482825	0,487384	0,552324	0,495785851
3 интервал	1-2-4-6-7-9	0,277269	0,432866	0,46752	0,638731	0,455169883
4 интервал	1-3-4-6-7-9	0,198242	0,224326	0,25037	0,420576	0,282869976
5 интервал	2-3-4-5-8-10	0,129445	0,19075	0,20213	0,294792	0,206556026
6 интервал	1-2-3-6-7-9	0,026764	0,098169	0,111165	0,238824	0,122876754
7 интервал	1-3-4-6-7-9	0,000187	0,015092	0,016824	0,053616	0,023139221
8 интервал	4-5-6	0	0,006671	0,007116	0,026684	0,011157218

Аналогично в таблицах 10-11 представлены варианты конфигураций СУДН МКА на каждом интервале постоянства системы и указанные выше показатели, полученные в результате применения технологии классической («слепой») реконфигурации.

*Таблица 10*

Значения ВБР и энергозатрат СУДН МКА при совместном и отдельном задействовании режимов ориентации для варианта «слепой» реконфигурации

<b>СЛЕПАЯ РЕКОНФИГУРАЦИЯ</b>
------------------------------

Интервал	Вариант конфигурации	ГНС равноценные	ГНС неравноц.	БезГНС равноценные	БезГНС неравноц.	Затраты энергии
1 интервал	1-2-3-6-7-9	0,893006	0,893006	0,83317	0,844394	73
2 интервал	1-2-3-6-7-9	0,460154	0,460154	0,343359	0,36911	73
3 интервал	1-2-3-6-7-9	0,313412	0,313412	0,151107	0,169048	73
4 интервал	1-2-3-6-7-9	0,156514	0,156514	0,037567	0,043004	73
5 интервал	1-2-3-6-7-9	0,037971	0,037971	0,011177	0,012586	73
6 интервал	4-5	0,236682	0,236682	0,059171	0,063115	30
7 интервал	4-5	0,157212	0,157212	0,039303	0,041923	30
8 интервал	4-5	0,103362	0,103362	0,025841	0,027563	30
9 интервал	4-5	0,044732	0,044732	0,011183	0,011929	30
10 интервал	4-5	0,018632	0,018632	0,004658	0,004969	30
11 интервал	4-5	0,005852	0,005852	0,001463	0,001561	30

Таблица 11

Значения вероятности выполнения отдельного режима ориентации СУДН МКА и всех режимов в целом для сценария «слепой» реконфигурации

<b>СЛЕПАЯ РЕКОНФИГУРАЦИЯ</b>						
Интервал	Вариант конфигурации	Все режимы ориентации	1 режим СКМ	2 режим СО	3 режим ВКИ	4 режим ЦО
1 интервал	1-2-3-6-7-9	0,784996945	0,8874	0,863441	0,913935	0,90725
2 интервал	1-2-3-6-7-9	0,225975587	0,476296	0,377702	0,602175	0,59675
3 интервал	1-2-3-6-7-9	0,062782877	0,251172	0,161504	0,391875	0,3875
4 интервал	1-2-3-6-7-9	0,004777989	0,069383	0,029349	0,164835	0,162
5 интервал	1-2-3-6-7-9	0,000311371	0,017752	0,004846	0,065535	0,06375

6 интервал	4-5	0	0	0,946729	0	0
7 интервал	4-5	0	0	0,628849	0	0
8 интервал	4-5	0	0	0,413449	0	0
9 интервал	4-5	0	0	0,178929	0	0
10 интервал	4-5	0	0	0,074529	0	0
11 интервал	4-5	0	0	0,023409	0	0

Так же, как и при использовании технологии структурно-функциональной реконфигурации, из таблицы 10 (по аналогии с таблицей 7) видно, что в некоторый момент времени (на условном 6 интервале времени) система переходит из работоспособного состояния в частично работоспособное и может выполнять лишь отдельный режим СО.

*Таблица 12*

Значения обобщенного показателя ВБР СУДН МКА в виде нечеткого числа и показателя дефаззификации для сценария «слепой» реконфигурации

<b>СЛЕПАЯ РЕКОНФИГУРАЦИЯ</b>						
Интервал	Вариант конфигурации	Трапецевидное нечеткое число				Центр тяжести
1 интервал	1-2-3-6-7-9	0,784997	0,83317	0,844394	0,893006	0,838921686
2 интервал	1-2-3-6-7-9	0,225976	0,343359	0,36911	0,460154	0,347889523
3 интервал	1-2-3-6-7-9	0,062783	0,151107	0,169048	0,313412	0,178133567
4 интервал	1-2-3-6-7-9	0,004778	0,037567	0,043004	0,156514	0,066727132
5 интервал	1-2-3-6-7-9	0,000311	0,011177	0,012586	0,037971	0,016633903
6 интервал	4-5	0	0,059171	0,063115	0,236682	0,098962496

7 интервал	4-5	0	0,039303	0,041923	0,157212	0,065734193
8 интервал	4-5	0	0,025841	0,027563	0,103362	0,043218223
9 интервал	4-5	0	0,011183	0,011929	0,044732	0,018703621
10 интервал	4-5	0	0,004658	0,004969	0,018632	0,007790588
11 интервал	4-5	0	0,001463	0,001561	0,005852	0,002446965

На основании полученных результатов можно сделать следующие важные выводы. Во-первых, применение структурно-функциональной реконфигурации позволяет сохранять способность функционирования МКА во всех четырех режимах до седьмого интервала включительно (в отличие от «слепой» реконфигурации, при которой, начиная с 6 интервала, СУД МКА работает только в режиме солнечной ориентации). Во-вторых, как видно из графика на рис.10, значения итогового показателя надежности функционирования СУД МКА, в качестве которого взят центр тяжести нечеткого трапециевидного числа, в случае структурно-функциональной реконфигурации принимает значения выше, чем при «слепой» реконфигурации, на каждом из рассматриваемых интервалах функционирования исследуемой системы до 6 интервала включительно. Примечательно то, что при использовании «слепой» реконфигурации система остается частично работоспособной (функционирует в режиме СО) на протяжении более длительного времени – до 11 интервалов. Однако выполнение целевых задач, очевидно, становится невозможным при таких функциональных возможностях системы. Следовательно, «выигрышным» данный подход назвать нельзя. Если оценивать среднюю интегральную надежность выполнения всех режимов ориентации СУДН МКА ДЗЗ на 6 интервалах времени, то

при использовании технологии структурно-функциональной реконфигурации получим величину 0,4004, а при «слепой» реконфигурации – 0,2414. Относительный выигрыш составляет 60%.

### **Заключение**

Для повышения сроков активного существования сложного многорежимного объекта необходимо, кроме всего прочего, осуществлять планирование реконфигурации с целью парирования отказов его элементов, а также выбора наиболее выгодной конфигурации ФЭ с целью рационального равномерного расходования имеющихся ресурсов и повышения качества функционирования объекта.

В настоящей статье представлен подход к планированию конфигурирования и реконфигурации СЛО. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о значительном влиянии выбора способа реконфигурации в процессе активного существования (выполнения целевых задач) объекта, а также наличия или отсутствия неопределенности циклограммы его функционирования.

### **Список источников**

1. Nayak A., Reyes Levalle 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, no. 23, pp. 6969-6983. DOI:[10.1080/00207543.2016.1146419](https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1146419)

2. Theorin A. et al. An event-driven manufacturing information system architecture for Industry 4.0 // *International Journal of Production Research*, 2017, vol. 55, no.5, pp. 1297–1311
3. Battaïa 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, no. 5, pp. 1368–1385
4. Севастьянов Н.Н., Андреев А.И. Основы управления надежностью космических аппаратов с длительными сроками эксплуатации. - Томск: Томский государственный университет, 2015. - 265 с.
5. Черкесов Г.Н., Недосекин А.О., Виноградов В.В. Анализ функциональной живучести структурно-сложных технических систем // *Надежность*. 2018. Т. 18. № 2. С. 17–24.
6. Mehdi Jafari. Optimal redundant sensor configuration for accuracy increasing in space inertial navigation system // *Aerospace Science and Technology*, 2015, vol. 47. pp. 467-472. DOI:[10.1016/j.ast.2015.09.017](https://doi.org/10.1016/j.ast.2015.09.017)
7. Райкунова Г.Г. Ионизирующие излучения космического пространства и их воздействие на бортовую аппаратуру космических аппаратов. - М.: Физматлит, 2013. - 256 с.
8. Букатова И.Л. Эволюционное моделирование и его приложения. - М.: Наука, 1979. – 232 с.
9. Поленин В.И., Рябинин И.А., Свиринов С.К., Гладкова И.А. Применение общего логико-вероятностного метода для анализа технических, военных организационно-

функциональных систем и вооруженного противоборства / Под ред. А.С. Можаяева. - СПб.: СПб–региональное отделение РАЕН, 2011. - 416 с.

10. Павлов А.Н., Воротягин В.Н., Кулаков А.Ю., Умаров А.Б. Исследование структурно-функциональной надёжности малых космических аппаратов при решении задач ориентации // Информатизация и связь. 2020. № 4. С. 156-164. DOI: [10.34219/2078-8320-2020-11-5-132-140](https://doi.org/10.34219/2078-8320-2020-11-5-132-140)

11. Павлов А.Н., Павлов Д.А., Умаров А.Б. Метод оценивания показателей живучести бортовых систем малых космических аппаратов в условиях изменяющихся режимов функционирования и деструктивных воздействий // Труды МАИ. 2021. № 120. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=161425>. DOI: [10.34759/trd-2021-120-11](https://doi.org/10.34759/trd-2021-120-11)

12. Pavlov A.N., Pavlov D.A., Vorotyagin V.N., Umarov. A.B. Structural and functional analysis of supply chain reliability in the presence of demand // Proceedings of Models and Methods for Researching Information Systems in Transport 2020, 2021, vol. 2803, pp. 61-66.

13. Павлов А.Н., Павлов Д.А., Алешин Е.Н., Воротягин В.Н., Умаров А.Б. Моделирование и анализ структурно-функциональной надёжности сложных многорежимных объектов // Труды ВКА имени А.Ф. Можайского. 2021. № 677. С. 186-194.

14. Pavlov A.N., Umarov A.B., Aleshin Ye.N. Study of the structural significance of supply chain elements with variable order rate // Intelligent Transport Systems. Transport Security – 2021. (CEUR-WS 2021), 2021, vol. 2924, pp. 1-8.

15. Кирилин А.Н., Ахметов Р.Н., Шахматов Е.В., Ткаченко С.И. и др. Опытнотехнологический малый космический аппарат «АИСТ-2Д». - Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2017. - 324 с.
16. Шипов М.Г. Гашение угловых скоростей КА «Аист-2Д» с использованием системы сброса кинетического момента // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника. Технологии и машиностроение. 2019. № 2. Т. 18. С. 121-127. DOI: [10.18287/2541-7533-2019-18-2-121-127](https://doi.org/10.18287/2541-7533-2019-18-2-121-127)
17. Филатов А.В., Ткаченко И.С., Тюгашев Е.В., Сопченко Е.В. Математическое обеспечение системы управления движением малого космического аппарата // Материалы Международной конференции и молодежной школы «Информационные технологии и нанотехнологии»: сборник трудов. - Самара, Самарский научный центр РАН, 2015. С. 290-294.
18. Васильков Ю.В., Тимошенко А.В., Советов В.А., Кирмель А.С. Методика оценки функциональных характеристик систем радиомониторинга при ограниченных данных о параметрах надежности // Труды МАИ. 2019. № 108. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=109557>. DOI: [10.34759/trd-2019-108-16](https://doi.org/10.34759/trd-2019-108-16)
19. Manuilov Yu.S., Pavlov A.N., Pavlov D.A, Slin'ko A.A. The Technique of Informational Interaction Structural-parametric Optimization of a Earth's Remote sensing Small Spacecraft Cluster. In book: Cybernetics and Algorithms in Intelligent Systems, Springer International Publishing Switzerland, 2018, vol. 3, pp. 155-166. DOI:[10.1007/978-3-319-91192-2\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-319-91192-2_17)



20. Бородин В.В. Оценка надежности обслуживаемых устройств орбитальной космической станции // Труды МАИ. 2012. № 58. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=33036>
21. ГОСТ 27.003-90. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. 1990.
22. Колодежный Л.П., Чернодаров А.В. Надежность и техническая диагностика. - - М.: ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, 2010. - 452 с.

## References

1. Nayak A., Reyes Levalle 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, no. 23, pp. 6969-6983. DOI:[10.1080/00207543.2016.1146419](https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1146419)
2. Theorin A. et al. An event-driven manufacturing information system architecture for Industry 4.0, *International Journal of Production Research*, 2017, vol. 55, no.5, pp. 1297–1311
3. Battaïa 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, no. 5, pp. 1368–1385
4. Sevast'yanov N.N., Andreev A.I. *Osnovy upravleniya nadezhnost'yu kosmicheskikh apparatov s dlitel'nymi srokami ekspluatatsii* (Fundamentals of Reliability Management of Spacecraft with Long Service Life), Tomsk, Tomskii gosudarstvennyi universitet, 2015, 265 p.

5. Cherkesov G.N., Nedosekin A.O., Vinogradov V.V. *Nadezhnost'*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 17–24.
6. Mehdi Jafari. Optimal redundant sensor configuration for accuracy increasing in space inertial navigation system, *Aerospace Science and Technology*, 2015, vol. 47. pp. 467-472. DOI: [10.1016/j.ast.2015.09.017](https://doi.org/10.1016/j.ast.2015.09.017)
7. Raikunova G.G. *Ioniziruyushchie izlucheniya kosmicheskogo prostranstva i ikh vozdeistvie na bortovuyu apparaturu kosmicheskikh apparatov* (Ionizing radiation from outer space and their impact on the onboard equipment of spacecraft), Moscow, Fizmatlit, 2013, 256 p.
8. Bukatova I.L. *Evolyutsionnoe modelirovanie i ego prilozheniya* (Evolutionary modeling and its applications), Moscow, Nauka, 1979, 232 p.
9. Polenin V.I., Ryabinin I.A., Svirin S.K., Gladkova I.A. *Primenenie obshchego logiko-veroyatnostnogo metoda dlya analiza tekhnicheskikh, voennykh organizatsionno-funktsional'nykh sistem i vooruzhennogo protivoborstva* (Application of the general logical-probabilistic method for the analysis of technical, military organizational-functional systems and armed confrontation), Saint Petersburg, SPb–regional'noe otделение RAEN, 2011, 416 p.
10. Pavlov A.N., Vorotyagin V.N., Kulakov A.Yu., Umarov A.B. *Informatizatsiya i svyaz'*, 2020, no. 4, pp. 156-164. DOI: [10.34219/2078-8320-2020-11-5-132-140](https://doi.org/10.34219/2078-8320-2020-11-5-132-140)
11. Pavlov A.N., Pavlov D.A., Umarov A.B. *Trudy MAI*, 2021, no. 120. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=161425>. DOI: [10.34759/trd-2021-120-11](https://doi.org/10.34759/trd-2021-120-11)
12. Pavlov A.N., Pavlov D.A., Vorotyagin V.N., Umarov. A.B. Structural and functional analysis of supply chain reliability in the presence of demand, *Proceedings of Models and*

*Methods for Researching Information Systems in Transport 2020, 2021*, vol. 2803, pp. 61-66.

13. Pavlov A.N., Pavlov D.A., Aleshin E.N., Vorotyagin V.N., Umarov A.B. *Trudy VKA imeni A.F. Mozhaiskogo*, 2021, no. 677, pp. 186-194.

14. Pavlov A.N., Umarov A.B., Aleshin Ye.N. Study of the structural significance of supply chain elements with variable order rate, *Intelligent Transport Systems. Transport Security – 2021. (CEUR-WS 2021)*, 2021, vol. 2924, pp. 1-8.

15. Kirilin A.N., Akhmetov R.N., Shakhmatov E.V., Tkachenko S.I. et al. *Opytno-tekhnologicheskii malyi kosmicheskii apparat «AIST-2D»* (Experimental and technological small spacecraft "AIST-2D"), Samara, Izd-vo SamNTs RAN, 2017, 324 p.

16. Shipov M.G. *Vestnik Camarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika. Tekhnologii i mashinostroenie*, 2019, no. 2, vol. 18, pp. 121-127. DOI: [10.18287/2541-7533-2019-18-2-121-127](https://doi.org/10.18287/2541-7533-2019-18-2-121-127)

17. Filatov A.V., Tkachenko I.S., Tyugashev E.V., Sopchenko E.V. *Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii i molodezhnoi shkoly «Informatsionnye tekhnologii i nanotekhnologii»: sbornik trudov*. Samara, Samarskii nauchnyi tsentr RAN, 2015, pp. 290-294.

18. Vasil'kov Yu.V., Timoshenko A.V., Sovetov V.A., Kirmel' A.S. *Trudy MAI*, 2019, no. 108. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=109557>. DOI: [10.34759/trd-2019-108-16](https://doi.org/10.34759/trd-2019-108-16)

19. Manuilov Yu.S., Pavlov A.N., Pavlov D.A., Slin'ko A.A. *The Technique of Informational Interaction Structural-parametric Optimization of a Earth's Remote sensing Small Spacecraft Cluster*. In book: *Cybernetics and Algorithms in Intelligent Systems*,

Springer International Publishing Switzerland, 2018, vol. 3, pp. 155-166. DOI:[10.1007/978-3-319-91192-2\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-319-91192-2_17)

20. Borodin V.V. *Trudy MAI*, 2012, no. 58. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=33036>

21. GOST 27.003-90. *Nadezhnost' v tekhnike. Sostav i obshchie pravila zadaniya trebovaniy po nadezhnosti* (Reliability in technology. Composition and general rules for setting reliability requirements), 1990.

22. Kolodezhnyi L.P., Chernodarov A.V. *Nadezhnost' i tekhnicheskaya diagnostika* (Reliability and technical diagnostics), Moscow, VVA im. prof. N.E. Zhukovskogo i Yu.A. Gagarina, 2010, 452 p.

Статья поступила в редакцию 24.06.2022

Статья после доработки 27.06.2022

Одобрена после рецензирования.18.08.2022

Принята к публикации 12.10.2022

The article was submitted on 24.06.2022; approved after reviewing on 18.08.2022; accepted for publication on 12.10.2022