

УДК 004.41

# НАДЕЖНОСТЬ РЕЗЕРВИРОВАННОГО БОРТОВОГО КОМПЬЮТЕРА КА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППИРОВКОЙ КА С НЕРЕЗЕРВИРОВАННЫМИ ВЫЧИСЛИТЕЛЯМИ

**И.В. Ашарина**

*Научно-исследовательский институт «Субмикрон»*

Россия, 124498, Москва, Зеленоград, Георгиевский проспект, 5, стр.2, этаж 4, помещ. I, комн. 50

*Национальный исследовательский университет МИЭТ, Институт МПСУ*

124498, Россия, Москва, Зеленоград, Площадь Шокина, 1

E-mail: asharinairina@mail.ru

**Ключевые слова:** сбое- и отказоустойчивость системы, статическая избыточность, динамическая избыточность, группировка космических аппаратов, надежность, вероятность безотказной работы.

**Аннотация:** Приводятся сравнительные характеристики резервированного центрального бортового компьютера космического аппарата и системы управления орбитальной группировкой малых космических аппаратов с нерезервированными бортовыми вычислителями, выполняющих задачу дистанционного зондирования Земли. Приведены достоинства и недостатки использования космического аппарата с резервированным центральным бортовым компьютером и группировки малых космических аппаратов с нерезервированными вычислителями.

## 1. Введение

Информационно-управляющие системы, в том числе и распределенные, применяются на промышленных объектах во многих отраслях народного хозяйства – в атомной энергетике, на железнодорожном и морском транспорте, в авиации и т.д. Но наиболее актуально применение отказоустойчивых распределенных многомашинных информационно-управляющих систем (РМИУС) в космической отрасли. Системы необслуживаемые, т.е. для них нет возможности обеспечить регламентные технические работы. Запуск, развертывание и использование систем космического базирования процесс дорогостоящий, поэтому увеличение сроков активного существования – одна из наиболее важных задач при разработке РМИУС космического применения.

Для РМИУС космического базирования необходимо обеспечить защиту от рисков: 1) исключение несанкционированного доступа, 2) исключение накопления латентных неисправностей, приводящего к внезапному отказу всей системы.

Увеличение сроков активного существования РМИУС обеспечивается: 1) необходимой самореконфигурацией системы с использованием имеющихся резервов, 2) самоуправляемой деградацией с переходом к безопасному останову системы (подсистемы) в случаях исчерпания ресурсов или возникновения неисправностей, не

предусмотренных моделью неисправности, 3) самореконfigurацией системы с целью перераспределения соотношения «производительность – безопасность».

При этом должны осуществляться не просто обнаружение и идентификация проявлений неисправностей, выполняемых внутри отдельных вычислителей РМИУС (результаты которых также могут быть ошибочными), а *системные обнаружение и идентификация*, при которых все исправные элементы системы принимают синхронизированные и согласованные решения, не противоречащие реальному техническому состоянию системы и определяющие дальнейший ход вычислительного процесса во всех элементах РМИУС.

## **2. Сравнительные надежностные характеристики 4-канального бортового компьютера и системы управления орбитальной группировкой малых космических аппаратов**

Для РМИУС космического применения характерны сложность обслуживания и управления ими, а высокая стоимость их разработки и эксплуатации приводит к необходимости создания современных технологий проектирования отказоустойчивых информационно-управляющих систем. Такие системы способны обеспечивать выполнение целевых задач как в условиях преднамеренного изменения конфигураций группировок, так и в условиях возникновения предусмотренных и непредусмотренных совокупностей неисправностей элементов систем и их последовательностей.

В качестве объекта для сравнения применяется центральный бортовой компьютер (ЦБК) космического аппарата (КА), который представляет собой 4-кратно резервированную (4-канальную) ЦВМ (ЦВМ-4), состоящую из 4 идентичных функциональных вычислительных модулей (ВМ) для обеспечения отказоустойчивости ЦБК. 4-канальный ЦБК осуществляет обмен информацией по мультиплексным каналам обмена (МКО) в соответствии ГОСТ Р 52070-2003. Управление конфигурацией/реконfigurацией выполняет контроллер управления конфигурацией (КУК), функциями которого являются включение/выключение вторичных питающих напряжений в ВМ, назначение модуля ВМ ведущим на МКО, включение/выключение передачи по бортовым сетевым каналам передачи, перезапуск ВМ.

4-канальный ЦБК обладает достоинствами: 1) отлаженная структура и технология, находящиеся в серийном производстве, 2) динамическое резервирование ВМ в различных сочетаниях в зависимости от целевых задач, 3) размещение всех ВМ в одном корпусе, связь между ВМ организована по быстродействующим и надежным МКО, 4) модель резервирования 4-канального ЦБК представляет собой полный граф, вершинами которого являются ВМ, ребрами – МКО, т.е. структура оптимальная [1-4].

Недостатки 4-канального ЦБК: 1) большая и дорогостоящая конструкция КА, потеря которого весьма ощутима, при этом вследствие размеров КА вероятность его повреждения космическим мусором или целенаправленными действиями существенно выше, чем КА меньших размеров; 2) единый корпус КА, при повреждении которого или при нарушении общей системы электропитания отключаются все каналы ЦБК; 3) относительно небольшая зона покрытия при решении задачи дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) или слежения за определенными наземными или околоземными объектами; 4) КУК состоит из микросхем, которые ухудшают надежность и увеличивают стоимость структуры ЦБК в целом, 5) структура «монолитная», следовательно, не масштабируемая.

Для решения проблемы, связанной с перечисленными недостатками, предлагается разбить 4-канальный ЦБК на взаимосвязанные нерезервированные ЦВМ, каждая из

которых располагается на отдельном КА малого класса. Организовать из них орбитальную группировку (ОГ) КА, которая будет работать как распределенный резервированный ЦБК, выполняя ту же задачу. Модель такой ОГ представляет собой граф, вершинами которого являются нерезервированные вычислители, каждый из которых находится на борту отдельного КА малого класса, а ребрами – каналы межспутниковой связи.

Пусть исходными данными для проведения расчета надежности 4-канального ЦБК являются: вероятность безотказной работы (ВБР) в течение 10000 часов должна быть не менее 0,986 согласно ГОСТ 23564-79.

Сравнение надежностных характеристик КА с 4-канальным ЦБК ЦВМ-4 и ОГ КА с одноканальными (нерезервированными) вычислителями (ЦВМ-1) возможно при анализе ВБР группировки, обеспечивающей выполнение задач мониторинга земной поверхности над одним участком [5 - 7]. В минимальном составе отказоустойчивая ОГ может быть организована из трех КА с 4-канальным ЦБК либо из 9 КА с одноканальными вычислителями. При этом для выполнения поставленной задачи КА с 4-канальным ЦБК должны функционировать независимо, а КА с одноканальными вычислителями объединяются в единую пиринговую ( $p2p$ ) сеть (рис. 1).

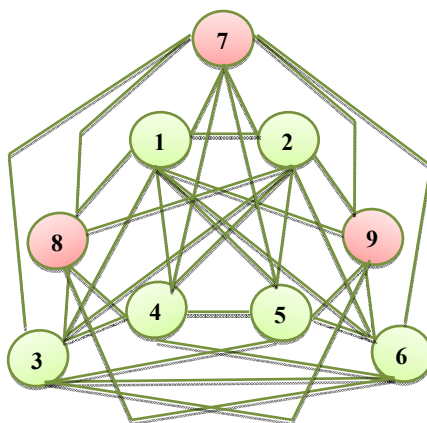


Рис. 1. Минимальная конфигурация ОГ КА с ЦВМ-1.

В сети, представленной на рис. 1, КА с номерами 1 – 6 работают постоянно, с номерами 7 – 9 находятся в горячем резерве так, что каждый из них может заменить отказавший рабочий КА. При этом каналы связи между всеми приборами, как выполняющими целевую задачу, так и находящимися в горячем резерве, должны обеспечивать возможность межмашинного отказоустойчивого информационного обмена. Кроме того, резервные приборы должны иметь возможность участвовать в процессе взаимного информационного согласования (ВИС) или служить ретрансляторами при межмашинном информационном обмене [3].

Расчет вероятности безотказной работы для системы, состоящей из  $N$  рабочих модулей и  $M$  находящихся в горячем резерве, соответствует параллельной структурной схеме надежности, проводится по формуле согласно ГОСТ Р 51901.14-2007:

$$P_{\text{системы}} = \sum_{k=0}^M C_{M+N}^k \cdot P^{N+M-k} \cdot (1-P)^k,$$

где  $P$  – вероятность безотказной работы одного модуля (блока),  $N$  – количество рабочих модулей,  $M$  – количество модулей, находящихся в горячем резерве,  $C$  – коэффициент, рассчитываемый по формуле  $C_{M+N}^k = \frac{(M+N)!}{k! \cdot (M+N-k)!}$ .

Расчетное значение ВБР ЦВМ-4 рассчитанное согласно ГОСТ 23564-79  $P_1 = 0,986$ . Расчетное значение ВБР ЦВМ-1 составляет  $P_2 = 0,887$ .

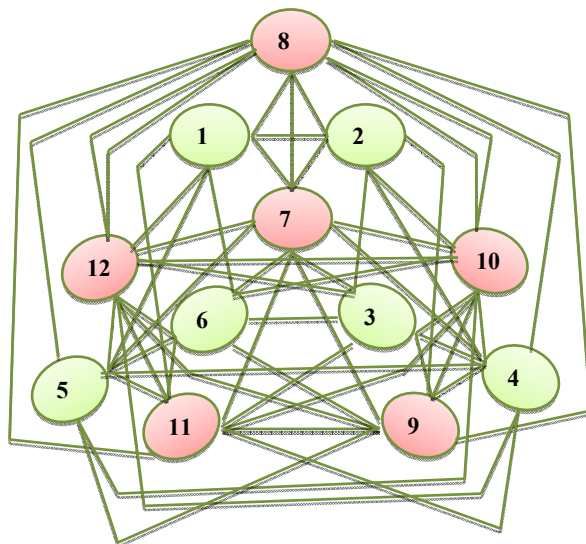
Стоит отметить сокращение суммарных массогабаритных характеристик ЦБК группировки, т.к. в четырехкратно резервированном исполнении группировка состоит из 12 модулей ВМ и 3 дополнительных объединительных панелей, а в минимальной конфигурации – только из 9 модулей ВМ.

Будем считать теперь, что каждая ОГ КА, заменяющая один КА с ЦБК ЦВМ-4, сможет сбое- и отказоустойчиво решать свою целевую задачу. Назовем такую орбитальную группировку комплексом. Одним из наиболее важных свойств комплекса является возможность его масштабирования, что открывает широкие возможности для построения распределенных систем на основе ОГ КА.

Предлагается структура ОГ КА, ориентированная на решение многозадачных заданий, каждая из задач задания решается на своем комплексе. Вычислим ВБР отдельно взятого комплекса из РМИУС, показанной на рис. 2, однозначно соответствующего одной резервированной ЦВМ-4 (комплекс 1 состоит из ЦВМ-1 № 1 и 2 – в рабочем режиме, ЦВМ-1 №7 и 8 – в горячем резерве, комплекс 2 состоит из ЦВМ-1 № 3 и 4 – в рабочем режиме, ЦВМ-1 №9 и 10 – в горячем резерве, комплекс 3 состоит из ЦВМ-1 № 5 и 6 – в рабочем режиме, ЦВМ-1 №11 и 12 – в горячем резерве:

$$P_{\text{ЦВМ-1-2+2}} = \sum_{k=0}^{M=2} C_{2+2}^k \cdot P_2^{2+2-k} \cdot (1 - P_2)^k = 3P_2^4 - 8P_2^3 + 6P_2^2 = 0,986,$$

что полностью соответствует  $P_1$  – ВБР ЦВМ-4.



**Рис. 2.** Конфигурация ОГ КА из 12 ЦВМ-1, соответствующая ОГ их трех КА с ЦБК ЦВМ-4.

Для РМИУС, организованной по алгоритмам, предложенным в [1 - 3] наличие 4-спутникового комплекса обеспечивает устойчивость к однократной неисправности враждебного типа, при котором неисправный вычислитель может вести себя не только произвольно, но и неодинаково по отношению к другим элементам РМИУС [8], но при этом комплекс не имеет резерва, поскольку все 4 ЦВМ находятся в рабочем режиме.

При добавлении одной резервной ЦВМ-1 ВБР 1-отказоустойчивого комплекса из пяти ЦВМ-1 (четыре в рабочем режиме и одна в горячем резерве), моделью которого является полный граф, вычисляется как

$$P_{\text{ЦВМ201-ОИ-4+1}} = \sum_{k=0}^{M=1} C_{4+1}^k \cdot P_2^{4+1-k} \cdot (1 - P_2)^k = 5P_2^4 - 4P_2^5 = 0,914271.$$

Сравнительные результаты расчета ВБР ОГ КА представлены в таблице 1.

**Таблица 1.** Результаты расчета вероятности безотказной работы ОГ КА.

ОГ КА	Описание ОГ КА	ВБР
$P_{\text{ЦБК-ЦВМ-4}}$	4-канальный ЦБК в классическом исполнении с резервом в составе	0,986
$P_{\text{ОГ-3-ЦБК-ЦВМ-4}}$	ОГ из трех КА с 4-канальным ЦБК	0,9646
$P_{\text{ОГ-ЦВМ-1-2+2}}$	2 рабочих КА с одноканальными ЦБК + 2 КА с одноканальными ЦБК в горячем резерве – полный аналог 4-канального ЦБК	0,986
$P_{\text{ОГ-ЦВМ-1-4+1}}$	4 рабочих КА с одноканальными ЦБК + 1 КА с одноканальными ЦБК в горячем резерве	0,9143
$P_{\text{ОГ-ЦВМ-1-4+2}}$	4 рабочих КА с одноканальными ЦБК + 2 КА с одноканальными ЦБК в горячем резерве	0,983
$P_{\text{ОГ-ЦВМ-1-8+2}}$	Двухкомплексная РМИУС: 8 рабочих КА с одноканальными ЦБК + 2 КА с одноканальными ЦБК в горячем резерве	0,9247
$P_{\text{ОГ-ЦВМ-1-8+4}}$	Двухкомплексная РМИУС: 8 рабочих КА с одноканальными ЦБК + 4 КА с одноканальными ЦБК в горячем резерве	0,995
$P_{\text{ОГ-ЦВМ-1-12+3}}$	Трехкомплексная РМИУС: 12 рабочих КА с одноканальными ЦБК + 3 КА с одноканальными ЦБК в горячем резерве	0,9394
$P_{\text{ОГ-ЦВМ-1-12+6}}$	Трехкомплексная РМИУС: 12 рабочих КА с одноканальными ЦБК + 6 КА с одноканальными ЦБК в горячем резерве	0,9986

### 3. Достоинства и недостатки ОГ малых КА

Достоинства предлагаемого решения: 1) потеря одного и даже нескольких малых КА (при достаточной мощности группировки) не представляет большой проблемы; 2) запустить ОГ КА можно с помощью одной ракеты-носителя «кассетным» способом; 3) решение соответствует общей тенденции, ориентированной на миниатюризацию и удешевление КА; 4) области покрытия при решении целевой задачи ДЗЗ либо мониторинга наземных или околоземных объектов могут перекрываться, следовательно, при потере части спутников выполнение целевой задачи гарантируется; 5) кратность резервирования при необходимости можно увеличить либо создать запас, находящийся в горячем резерве, т.к. такая структура легко масштабируется; 6) расчетная ВБР больше за счет отсутствия КУК, т.е., меньшего количества электронной компонентной базы, а также иной схемы резервирования.

Сложности разработки ОГ КА: 1) организация каналов связи между КА в ОГ; 2) необходимость обеспечения ВИС целевых и служебных данных, получаемых в результате функционирования РМИУС; 3) недостаточная мощность приемно-передающих устройств либо потеря видимости КА, т.е. необходимость ретрансляторов.

### 4. Заключение

Как показывают расчеты, для выполнения целевой задачи при заданных надежностных характеристиках ОГ КА с  $N$ -канальными ЦБК достаточно ОГ КА с нерезервированными вычислителями, организованной по предложенным в [1-3] алгоритмам и состоящей из  $N = 3\mu + 1$  ( $\mu$  – допустимое число неисправных вычислителей в комплексе) рабочих КА и  $M$  КА в горячем резерве. Масштабирование позволяет обеспечить режим, когда каждая ОГ КА, заменяющая один КА с резервированным ЦБК, может сбое- и отказоустойчиво решать свою целевую задачу, следовательно, осуществляется переход к многозадачному функционированию РМИУС, что открывает широкие возможности для построения распределенных систем на основе ОГ КА.

### Список литературы

1. Ашарина И.В., Лобанов А.В. Выделение комплексов, обеспечивающих достаточные структурные условия системного взаимного информационного согласования в многокомплексных системах // Автоматика и телемеханика. 2014. № 6. С. 115-131.
2. Ашарина И.В., Лобанов А.В. Выделение структурной среды системного взаимного информационного согласования в многокомплексных системах // Автоматика и телемеханика. 2014. № 8. С. 146-156.
3. Ашарина И.В. Распределенный алгоритм системного взаимного информационного согласования в многокомплексных вычислительных системах // Образовательные ресурсы и технологии (Вестник московского университета им. С.Ю. Витте). Москва, 2014. № 2 (5). С. 45-50.
4. Нефедов В.Н., Осипова В.А. Курс дискретной математики. М.: Изд-во МАИ, 1992, 263 с.
5. Надежность электрорадиоизделий, М.: 22 ЦНИИ МО РФ, 2006.
6. Справочник. «Надежность ЭРИ ИП», 2006.
7. Лазута И.В. Диагностика и надежность автоматизированных систем. Конспект лекций. Омск: СибАДИ, 2018. 73 с.
8. Мамедли Э.М., Самедов Р.Я., Соболев Н.А. Метод локализации «дружественных» и «враждебных» неисправностей // Автоматика и телемеханика. 1992. №. 5. С. 126-138.