

# КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ. ИССЛЕДОВАНИЕ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

УДК 62-501.72:681.326.7

## ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫМИ ГРУППИРОВКАМИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ КАК ОСНОВА ПОСТРОЕНИЯ СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

И. В. Ашарина, В. Ю. Гришин, В. Г. Сиренко

*Рассматриваются вопросы построения сбое- и отказоустойчивых систем управления группировками космических аппаратов. Определено понятие комплекса, предназначенного для обеспечения отказоустойчивости выполнения целевой задачи, например, дистанционного зондирования Земли. Предложена масштабируемая структура организации группировки космических аппаратов. Обоснована необходимость применения динамической избыточности, позволяющей существенно увеличить траекторию самоуправляемой деградации группировки космических аппаратов, а, следовательно, и сроки активного существования. Предполагается, что распределенная многомашинная информационно-управляющая система должна выполнять целевые задачи, используя свои аппаратные средства, в которых могут возникать неисправности, которые необходимо обнаруживать, идентифицировать и парировать. Рассматривается проблема обеспечения гарантированной способности работы группировок космических аппаратов в условиях, когда их вычислители не всегда обладают достаточной надежностью, которая решается посредством выбора архитектурных решений для автоматических самореconfigурируемых и самовосстанавливаемых сбое- и отказоустойчивых распределенных систем сетевой структуры, обеспечивающих заданную длительность срока активного существования.*

*Ключевые слова:* распределенная многомашинная вычислительная система, сбое- и отказоустойчивость; динамическая избыточность, враждебная (византийская) неисправность, дистанционное зондирование Земли, группировки космических аппаратов.

### Введение

В настоящее время общей тенденцией развития орбитальных космических аппаратов является уменьшение их массогабаритных характеристик, вследствие чего такие аппараты чаще всего оказываются нерезервированными. Однако одним из основных требований к искусственным космическим объектам различного назначения является сбое- и отказоустойчивость, реализовать которую в современных условиях возможно только путем резервирования. Этого можно достичь созданием группировок космических аппаратов (КА).

Для существенного увеличения срока активного существования (САС) группировок КА необходимо использование динамической избыточности, обеспечивающей существенное удлинение траектории деградации таких группировок при сохранении правильной целевой работы, с переходом в безопасный останов системы в случаях исчерпания ресурсов или возникновения недопустимых совокупностей и/или последовательностей неисправностей.

В автоматических самореconfigурируемых и самовосстанавливаемых распределенных многомашинных информационно-управляющих системах (РМИУС) сетевой структуры, параллельно решающих совокупности взаимодействующих целевых задач, заданный уровень сбое- и отказоустойчивости каждой целевой задачи обеспечивается путем ее репликации – параллельного выполнения копий этой целевой задачи на нескольких избыточных вычислителях, образующих сбое- и отказоустойчивый комплекс, с обменом результатами и выбором из них правильного в предположении, что только

не более чем определенная часть этих результатов, определяющая меру сбое- и отказоустойчивости данной целевой задачи, будет ошибочной.

Разработка отечественных бортовых цифровых вычислительных систем (БЦВС) с высокими эксплуатационными характеристиками позволяет обеспечить эффективность решения целевых задач разрабатываемыми и перспективными КА и их группировками различного назначения, функционирующими на разных орбитах. Это требует проектирования бортовых комплексов управления (БКУ), способных применяться для сложного космического объекта или группировок таких объектов в критических условиях.

Такой подход определяет спектр возможных космических объектов, требующих создания приемлемого БКУ, с точки зрения вычислительной мощности и потоков обрабатываемой информации:

- микроКА с отдельным вычислителем и малыми потоками обрабатываемой информации;
- мини-КА, БЦВС которого содержит более одного вычислителя, обработка потоков информации средней мощности;
- малофункциональный КА, БЦВС которого предназначена для обработки потока информации высокой мощности;
- многофункциональный КА (в том числе пилотируемый), многомашинная БЦВС для решения параллельных взаимодействующих, комплексных задач;
- группировка из микро- и миниКА, взаимодействующих между собой для решения общих синергетических задач путем взаимобмена информацией между всеми КА;

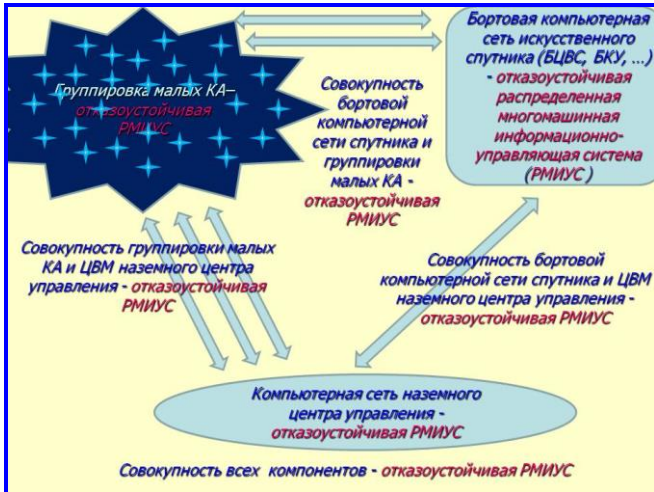


Рис. 1. Иерархическая структура РМИУС

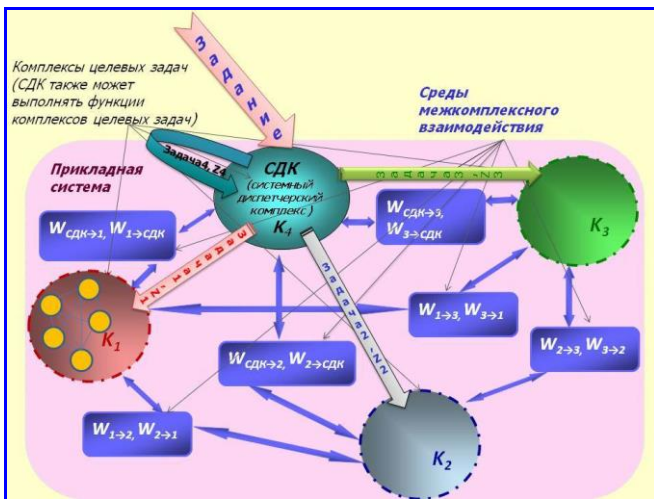


Рис. 2. Пример структуры РМИУС на основе группировки КА: СДК – системный диспетчерский комплекс;  $K_1, K_2, K_3$  – комплексы, решающие целевые задачи поступившего из внешней среды задания;  $W_{i \rightarrow j}$  и  $W_{j \rightarrow i}$  – среды межкомплексного взаимодействия между комплексами  $i$  и  $j$ , причем  $W_{i \rightarrow j}$  и  $W_{j \rightarrow i}$  могут не совпадать

– группировка из КА всех вышеперечисленных типов и наземных средств, обеспечивающая решение критических проблем.

Таким образом, можно построить иерархическую РМИУС, которая включает в себя следующие компоненты: группировку малых космических аппаратов, бортовую компьютерную систему искусственного спутника (БЦВС, БКУ и т. д.), взаимодействующего с этой группировкой, компьютерную систему наземного центра управления (рис. 1). Каждый компонент (который может рассматриваться как подсистема) в отдельности, компоненты в раз-

личных сочетаниях, среда взаимодействия между компонентами [1] и вся система в целом представляют собой сбое- и отказоустойчивую РМИУС, поэтому построение архитектуры каждого из компонентов и построение архитектуры системы в целом должно базироваться на единых принципах, в основе которых лежит понятие сбое- и отказоустойчивости.

Совокупность БЦВС перспективных КА, их группировок и средств взаимодействия с наземными комплексами представляет собой космическую распределенную многомашинную информационно-управляющую систему (космическую РМИУС), построенную на основе «сети сетей», включающей бортовые вычислительные сети, в каждую из которых входят элементы сети и каналы связи между ними, а также каналы радиотехнической связи БЦВС между КА при групповом их полете и с наземными комплексами управления. В совокупности космическая РМИУС и сети наземных комплексов составляют глобальную сетевую распределенную многомашинную вычислительную систему.

В данной работе речь идет только об организации РМИУС на основе группировки КА.

### Архитектура многоуровневой РМИУС на основе группировки КА

Рассмотрим четырехуровневую архитектуру сбое- и отказоустойчивой РМИУС на основе группировки КА (рис. 2) [2].

Нижний, программно-аппаратный уровень образуют отдельные нерезервированные вычислители, расположенные на КА, представляющие собой БЦВС КА, с их аппаратно-программным обеспечением, на основе которых реализованы все вышеперечисленные архитектурные уровни РМИУС. Эти вычислители объединены в пиринговую сеть, на основе которой строятся элементы РМИУС, представляющие собой комплексы, обеспечивающие сбое- и отказоустойчивое выполнение целевых задач, и среды межкомплексного взаимодействия, обеспечивающие гарантоспособность [3] межкомплексного обмена сообщениями.

На втором уровне организуются две важных подсистемы РМИУС – подсистема ведения единого системного времени [4, 5] и подсистема системного самодиагностирования РМИУС. На этом же уровне происходит создание системного диспетчерского комплекса (СДК), являющегося распределенным сбое- и отказоустойчивым управляющим органом формируемой РМИУС [6].

Подсистема системного диагностирования начинает действовать при начальном включении исходной системы, и ее диагностирующие механизмы строят в каждом исправном вычислителе исходной системы при помощи механизмов взаимного информационного согласования (ВИС) одинаковые таблицы технического состояния (ТТС) исходной системы с указанием всех исправных ее элементов. Здесь под механизмом понимается совокупность системных (аппаратных и программных) средств реализации заданных действий.

Затем все исправные вычислители исходной системы на основе информации из ТТС в соответствии с некоторым заданным принципом выбирают одну и ту же группу исправных вычислителей, которая обладает достаточной степенью связности, исходя из заданного для нее уровня требуемой сбое- и отказоустойчивости. На основе этой группы согласованно в исходной системе и выделяется СДК.

Третий архитектурный уровень создаваемой РМИУС составляют комплексы целевых задач, сформированные СДК в соответствии с заданием, полученным им из внешней среды и среды межкомплексного взаимодействия, обеспечивающие все процессы согласования в РМИУС – связанные с выполнением целевого задания и служебные, гарантирующие достижение системного ВИС.

Далее в СДК передается управление действиями по дальнейшему формированию РМИУС, а также по управлению этой РМИУС в процессе ее целевой работы [7 – 9]. Это представляет собой четвертый архитектурный уровень.

Основой построения РМИУС является комплекс – группа БЦВС, удовлетворяющая определенным математически доказанным структурным требованиям и обеспечивающая сбое- и отказоустойчивое решение задачи на основе репликации [10]. Взаимодействие между комплексами, решающими взаимосвязанные задачи, а также между комплексами, решающими задачи и СДК осуществляется через сбое- и отказоустойчивые среды межкомплексного взаимодействия [11, 12],  $W_{i \rightarrow j}$  (рис. 2), где  $i$  – комплекс-источник данных;  $j$  – комплекс-получатель данных [10].

Принципы, на которых строятся многоуровневые РМИУС на основе группировки КА, совпадают с принципами построения распределенных систем, где под распределенной системой понимается совокупность автономных вычислителей, объединенных общей глобальной сетью и способных действовать как самостоятельно, так и в группе для выполнения общей целевой функции. Наличие многочисленных вычислителей незаметно для пользователя за счет программного обеспечения (ПО),

находящегося над операционной системой и называемого связующим ПО [13 – 15].

Многоуровневые РМИУС на основе группировки КА могут служить основой для построения сетецентрических систем.

### Особенности сетецентрических систем управления

Системы рассматриваемого класса относятся к одноранговым, децентрализованным или пиринговым (от англ. peer-to-peer, P2P – «равный к равному») сетям – это оверлейные компьютерные сети, основанные на равноправии участников, когда каждый узел (peer) может выполнять как функции клиента, так и функции сервера. В отличие от архитектуры клиент-сервера такая организация позволяет обеспечивать длительный срок активного существования и продолжительную траекторию управляемой деградации.

Особенностями сетецентрических систем управления являются:

- автономность БЦВС, отсутствие общей памяти, межмашинное взаимодействие по двухточечным и шинным каналам связи;
- многоуровневость системы и отсутствие централизованного управляющего органа;
- необходимость самоорганизации системы для обеспечения масштабирования, защиты от внешних воздействий, воздействий неисправностей и ошибок проектирования;
- работа в режиме реального времени;
- большой срок активного существования;
- высокие требования по надежности работы и достоверности результатов [16 – 18].

При этом наиболее важными характеристиками таких систем являются:

- от пользователей скрыты различия между компьютерами и способы связи между ними;
- пользователи и приложения единообразно работают в распределенных системах, независимо от того, где и когда происходит их взаимодействие;
- они должны относительно легко поддаваться расширению или масштабированию;
- распределенные системы обычно существуют постоянно, однако некоторые их части могут временно выходить из строя. Пользователи и приложения не должны уведомляться о появлении неисправностей, о восстановлении работоспособности сбившихся вычислителей, о реконфигурации системы.

Отличительными особенностями сетецентрического управления также являются:

- взаимодействие многопрофильных подсистем сильносвязанных стационарных и/или мобильных объектов в едином информационном пространстве,

позволяющее обеспечить формирование целостной «картины» событий, адекватно отражающей текущее состояние всей системы в реальном времени;

– в соответствии с заложенной моделью управления и с учетом «компетенции» управляемых единиц для каждого объекта вырабатываются согласованные управляющие воздействия, направленные на достижение целей управления.

Эти особенности обязательно должны присутствовать в сетевых системах, однако не каждая модель управления в такой системе будет сетевой. Поэтому требуется отметить те отличия, которые присущи именно сетевым системам управления:

– все элементы системы должны быть привязаны к единому координатно-временному полю, т.е. должны действовать в едином пространстве состояний;

– данные для совместного использования должны предоставляться своевременно и бесшовно;

– система должна быть самоорганизующейся, т.е. быть способной поддерживать, восстанавливать и адаптировать к новым условиям свою структуру и поведение, в частности быть устойчивой к частичным отказам узлов сети и линий связи;

– система должна быть открытой;

– система должна быть способной порождать цели внутри себя;

– система принятия решений должна быть распределенной и слабоиерархической, с активными промежуточными слоями. Слабые связи между уровнями означают, что каждый узел нижележащего уровня связан с более чем одним узлом вышележащего уровня.

Открытая система определяется как исчерпывающий и согласованный набор международных стандартов на информационные технологии и профили функциональных стандартов, которые реализуют открытые спецификации на интерфейсы, службы и поддерживающие их форматы, чтобы обеспечить взаимодействие (интероперабельность) и мобильность программных приложений, данных и персонала (определение, сформулированное специалистами комитета 1003 Института инженеров по электротехнике и электронике (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) в стандарте POSIX 1003.0).

Наиболее важным свойством сетевых систем управления является эмерджентность (emergent), т.е. эффект возникновения в целой системе новых качеств и свойств, которые не присущи ни одному из структурно-функциональных элементов, в нее входящих. Кроме того, она обладает свойствами потенциальной эффективности и необходимого разнообра-

зия, т.е. сложность структуры системы связана со сложностью ее поведения и должна быть не меньше сложности решаемой задачи.

На основании всего вышеизложенного можно дать следующее определение термина «сетевая система управления»:

Сетевая система управления – система управления распределенной системой, построенная на принципах:

– открытости;

– самоорганизации;

– слабой иерархии в контуре принятия согласованных решений;

– способности порождать цели внутри себя;

– параллельного решения взаимосвязанных задач в режиме реального времени;

– обеспечения информационной безопасности (заданной достоверности выдаваемой информации, заданной сбое- и отказоустойчивости для каждой из решаемых задач критического применения).

### Проблемы создания сетевых систем

Проблемы создания РМИУС, лежащих в основе построения сетевых систем, состоят в организации совместных действий большого количества разнородных БЦВС, объединенных в гетерогенную сеть.

Факторами сложности при проектировании сбое- и отказоустойчивых систем рассматриваемого класса являются: а) неприемлемость традиционных моделей неисправностей БЦВС; б) необходимость распределенного, синхронизированного и согласованного принятия решения; в) необходимость организации и управления динамической избыточностью системы (самореконфигурация и самоуправляемая деградация системы с переходом в безопасный останов при исчерпании ресурсов) при возникновении неисправностей или манипулировании соотношением «производительность – достоверность» для различных параллельно решаемых взаимодействующих целевых задач.

Из всех используемых в настоящее время моделей неисправностей цифровых вычислительных машин (ЦВМ) [19] наиболее общей является модель враждебной (byzantine, rigorous, malicious) неисправности, при которой поведение неисправного вычислителя или БЦВС допускается полностью произвольным, в том числе и подобным «злонамеренному», включая его неодинаковость по отношению к другим элементам системы. Эта модель покрывает все остальные модели, и методы организации сбое- и отказоустойчивых вычислений в условиях возникновения враждебных неисправностей будут обеспечивать защиту

и от неисправностей всех других моделей. Модель враждебной неисправности отражает сложность нахождения причинно-следственной связи между видами проявлений неисправностей и имеющимися в действительности неисправностями таких сложных объектов как современная ЦВМ.

Повышение отказоустойчивости сетецентрической распределенной системы может достигаться за счет дорогостоящего обеспечения отказоустойчивости входящих в нее ЦВМ путем применения в них  $n$ -модульной избыточности (резервирования) и мажорирования выходных значений всех избыточных модулей. Другой подход, более учитывающий сетевую особенность рассматриваемых систем (замкнутость системы, наличие большого количества взаимосвязанных распределенных ЦВМ и возможность оперативного формирования из них требуемых вычислительных структур), состоит в репликации задач и введении в систему динамической избыточности, обеспечивающих: 1) парирование проявлений допустимых враждебных неисправностей за счет параллельного выполнения одной и той же задачи на нескольких ЦВМ с обменом полученными результатами и выбором из них правильного; 2) обнаружение и идентификацию по месту возникновения и типу (сбой, программный сбой, отказ) возникающих неисправностей; 3) восстановление целевой работы и исправления ошибочной информации после сбоев и программных сбоев; 4) реконфигурацию системы (с использованием запасных элементов) и восстановление целевой работы после отказов; 5) управляемую деградацию системы с возможным допустимым снижением характеристик вплоть до предельно заданной возможной конфигурации; 6) безопасный останов системы при невозможности построения такой конфигурации; 7) возможность перераспределения ресурсов системы для изменения соотношения производительность – достоверность между различными решаемыми задачами. Именно этот подход рассматривается в данной работе.

Согласованность действий и принимаемых решений в различных БЦВС и подсистемах гарантируется применением алгоритмов ВИС [20]. Достижимость ВИС составляет концептуальную основу создания отказоустойчивых алгоритмов для решения основных задач организации распределенных вычислений.

### Заключение

Объектом исследования является распределенная сбое- и отказоустойчивая многомашинная РМИУС сетевой архитектуры для управления группировками перспективных КА различного назначения.

Рассмотрены вопросы построения архитектуры многоуровневой РМИУС на основе группировки КА, особенности сетецентрических систем управления, проблемы создания сетецентрических систем.

В основе архитектуре РМИУС лежит компьютерная сеть, основанная БЦВС КА. Поскольку космические РМИУС являются элементами глобальных РМИУС, то рассмотрены вопросы построения сетецентрических информационно-управляющих глобальных РМИУС. Показано, что такие системы критического применения должны обязательно строиться с учетом всех требований по обеспечению их сбое- и отказоустойчивости.

### Литература

1. Ашарина И. В. Выделение комплексов, обеспечивающих достаточные структурные условия системного взаимного информационного согласования в многокомплексных системах / И. В. Ашарина, А. В. Лобанов // Автоматика и телемеханика. – 2014. – № 6. – С. 115–131.
2. Лобанов А. В. Архитектурная унификация методов и алгоритмов обеспечения сбое- и отказоустойчивости распределенных многокомплексных бортовых цифровых вычислительных систем сетевой структуры / А. В. Лобанов, И. В. Ашарина // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии : сборник трудов XV Международной научно-практической конференции ИНФО-2018 ; под. ред. С.У. Увайсова – Москва : Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. проф. Жуковского, 2018. – С. 218–225.
3. Авиженис А. Гарантоспособные вычисления: от идеи до реализации / А. Авиженис, Ж.-К. Лапри // ТИИЭР. – 1986. – Т. 74. – №. 5. – С. 8–21.
4. Ашарина И. В. Синхронизация часов в распределенных многомашинных вычислительных системах. Часть I / И. В. Ашарина // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2021. – Вып. 4. – DOI : 10.18698/2308-6033-2021-4-2074.
5. Ашарина И. В. Синхронизация часов в распределенных многомашинных вычислительных системах. Часть II / И. В. Ашарина // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2021. – Вып. 5. – DOI : 10.18698/2308-6033-2020-5-2081.
6. Ашарина И. В. Организация интерфейса отказоустойчивости в многозадачной распределенной информационно-управляющей многомашинной вычислительной системе сетевой структуры / И. В. Ашарина, А. В. Лобанов // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии : сборник трудов XV Международной научно-практической конференции ИНФО-2018 ; под. ред. С. У. Увайсова. – Москва : Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. проф. Жуковского. – 2018. – С. 226–229.
7. Лобанов А. В. Взаимное информационное согласование в неполносвязных многомашинных вычислительных системах / А. В. Лобанов, И. В. Ашарина, И. Г. Мищенко // Автоматика и телемеханика. – 2003. – № 5. – С. 190–198.
8. Ашарина И. В. Задачи взаимного информационного согласования в многокомплексной вычислительной системе /

- И. В. Ашарина, А. В. Лобанов // Компьютерные науки и технологии. Сборник трудов Первой Международной научно-технической конференции. – Белгород, 2009. – С. 131–133.
9. Ашарина И. В. Модели межкомплексного взаимного информационного согласования / И. В. Ашарина // Компьютерные науки и технологии. Сборник трудов Первой Международной научно-технической конференции. – Белгород, 2009. – С. 128–131.
10. Ашарина И. В. Выделение комплексов, обеспечивающих достаточные структурные условия системного взаимного информационного согласования в многокомплексных системах / И. В. Ашарина, А. В. Лобанов // Автоматика и телемеханика. – 2014. – № 6. – С. 115–131.
11. Топорков В. В. Модели распределенных вычислений / В. В. Топорков. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 320 с.
12. Ашарина И. В. Выделение структурной среды системного взаимного информационного согласования в многокомплексных системах / И. В. Ашарина, А. В. Лобанов // Автоматика и телемеханика. – 2014. – № 8. – С. 146–156.
13. Tanenbaum A. S. Distributed Systems: Principles and Paradigms / A. S. Tanenbaum, M. Van Steen. – Second Edition. – Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall, 2007. – 686 p.
14. Тানেбаум Э. Компьютерные сети / Э. Тানেбаум, Д. Уззеролл. – 5-е изд. – Санкт-Петербург : Питер, 2012. – 960 с.
15. Тানেбаум Э. Современные операционные системы / Э. Тানেбаум. – 3-е изд. – Санкт-Петербург : Питер, 2010. – 1120 с.
16. Макетный образец высокоадаптивной распределенной сетевидной многокомплексной сбое- и отказоустойчивой управляющей системы – актуальная проблема / А. В. Лобанов, И. В. Ашарина, В. Ю. Гришин [и др.] // Научно-технические проблемы в космических исследованиях Земли. – 2018. – № 1. – С. 48–55.
17. Гришин В. Ю. Сетевидная война и живучесть системы ее управления. Часть 1 / В. Ю. Гришин, А. В. Лобанов, В. Г. Сиренко // Новый оборонный заказ. Стратегии. – 2014. – № 2 (29). – С. 52–53.
18. Гришин В. Ю. Сетевидная война и живучесть системы ее управления. Часть 2 / В. Ю. Гришин, А. В. Лобанов, В. Г. Сиренко // Новый оборонный заказ. Стратегии. – 2014. – № 3 (30). – С. 46–49.
19. Barborak M. The consensus problem in fault-tolerant computing / M. Barborak, A. Dahbura, M. Malek // ACM Computing Surveys (CSUR). – 1993. – Vol. 25. – Issue 2. – P. 171–220.
20. Lamport L. The byzantine generals problem / L. Lamport, R. Shostak, M. Pease // ACM Trans. Progr. Lang. and Syst. – 1982. – Vol. 4. – No. 3. – P. 382–401.

Поступила в редакцию 01.06.2023

*Ирина Владимировна Ашарина, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, e-mail: asharinairina@mail.ru.*

*Вячеслав Юрьевич Гришин, кандидат технических наук, 1-й заместитель генерального директора, главный конструктор, e-mail: grishin@se.zgrad.ru.*

*Владимир Григорьевич Сиренко, доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора по перспективным проектам, e-mail: vgsirenko@mail.ru. (АО «НИИ «Субмикрон»).*

## FAULT-TOLERANT CONTROL SYSTEMS FOR PROMISING SPACECRAFT GROUPINGS AS A BASIS FOR BUILDING NETWORK-CENTRIC SYSTEMS

**I. V. Asharina, V. Ju. Grishin, V. G. Sirenko**

*The issues of building fault- and fault-tolerant control systems for spacecraft groupings (SPACECRAFT) are considered. The concept of a complex designed to ensure fault tolerance of the target task, for example, remote sensing of the Earth, is defined. A scalable structure of the organization of the spacecraft groups is proposed. The necessity of using dynamic redundancy is substantiated, which allows to significantly increase the trajectory of self-managed degradation of the spacecraft grouping, and, consequently, the duration of active existence. It is assumed that a distributed multi-machine information and control system should perform targeted tasks by using its hardware, in which malfunctions may occur that need to be detected, identified and countered. The problem of ensuring the reliability of the work of spacecraft groupings in conditions when their calculators do not always have sufficient reliability is considered, which is solved by choosing architectural solutions for automatic self-reconfigurable and self-repairing failure- and fault-tolerant distributed systems of a network structure that are provide a given duration of their active existence.*

**Keywords:** distributed multi-machine computing system, failure and fault tolerance, dynamic redundancy, hostile (Byzantine) malfunction, remote sensing of the Earth (remote sensing), groups of spacecraft (spacecraft).

### References

1. Asharina I. V. Identification of complexes that ensure sufficient structural conditions for system information coordination in complex systems / I. V. Asharina, A. V. Lobanov // Automation and Remote Control. – 2014. – No. 6. – P. 115–131.
2. Lobanov A. V. Architectural unification of methods and algorithms for ensuring failure and fault tolerance of distributed complex on-board digital computer systems of a network structure / A. V. Lobanov, I. V. Asharina // Innovative information

- and communication technologies : Collected proceedings of the XVth International research and practical conference INFO-2018 ; edited by S. U. Uvaysov – Moscow : Association of graduates and personnel of Zhukovsky Air Force Engineering Academy, 2018. – P. 218–225.
3. Avizienis A. Dependable computing: from concepts to design diversity / A. Avizienis, J.-C. Laprie // Proceedings of the IEEE. – 1986. – V. 74. – No. 5. – P. 8–21.
  4. Asharina I. V. Clock synchronization in distributed multi-computer systems. Part I / I. V. Asharina // Engineering Journal: Science and Innovation. – 2021. – Issue 4. – DOI : 10.18698/2308-6033-2021-4-2074.
  5. Asharina I. V. Clock synchronization in distributed multi-computer systems. Part II / I. V. Asharina // Engineering Journal: Science and Innovation. – 2021. – Issue 5. – DOI : 10.18698/2308-6033-2020-5-2081.
  6. Lobanov A. V. Architectural unification of methods and algorithms for ensuring failure and fault tolerance of distributed complex on-board digital computer systems of a network structure / A. V. Lobanov, I. V. Asharina // Innovative information and communication technologies : Collected proceedings of the XVth International research and practical conference INFO-2018 ; edited by S. U. Uvaysov – Moscow : Association of graduates and personnel of Zhukovsky Air Force Engineering Academy, 2018. – P. 218–225.
  7. Lobanov A. V. Information coordination in partially connected multi-computer systems / A. V. Lobanov, I. V. Asharina, I. G. Mishchenko // Automation and Remote Control. – 2003. – No. 5. – P. 190–198.
  8. Asharina I. V. Issues of information coordination in a complex computer system / I. V. Asharina, A. V. Lobanov // Computer Science and Technologies. Collected proceedings of the First International Scientific Conference. – Belgorod, 2009. – P. 131–133.
  9. Asharina I. V. Models of intersystem information coordination / I. V. Asharina // Computer Science and Technologies. Collected proceedings of the First International Scientific Conference. – Belgorod, 2009. – P.128–131.
  10. Asharina I. V. Identification of complexes that ensure sufficient structural conditions for system information coordination in complex systems / I. V. Asharina, A. V. Lobanov // Automation and Remote Control. – 2014. – No. 6. – P. 115–131.
  11. Toporkov V. V. Distributed computing models / V. V. Toporkov. – Moscow : FIZMATLIT, 2004. – 320 p.
  12. Asharina I. V. Identification of structural environment of system information coordination in complex systems / I. V. Asharina, A. V. Lobanov // Automation and Remote Control. – 2014. – No. 8. – P. 146–156.
  13. Tanenbaum A. S. Distributed Systems: Principles and Paradigms / A. S. Tanenbaum, M. Van Steen. – Second Edition. – Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall, 2007. – 686 p.
  14. Tanenbaum A. Computer networks / A. Tanenbaum, D. Wheatherall. – 5th ed. – Saint-Petersburg : Piter, 2012. – 960 p.
  15. Tanenbaum A. Modern operating systems / A. Tanenbaum. – 3rd ed. – Saint-Petersburg : Piter, 2010. – 1120 p.
  16. A model of a highly adaptive distributed network-centric complex fault-tolerant and failure-resistant control system – critical issue / A. V. Lobanov, I. V. Asharina, V. Yu. Grishin [et al.] // Hi-tech and Earth Space Research. – 2018. – No. 1. – P. 48–55.
  17. Grishin V. Yu. Network-centric warfare and survivability of its control system. Part 1 / V. Yu. Grishin, A. V. Lobanov, V.G. Sirenko // New Defence Order. Strategy. – 2014. – No. 2 (29). – P. 52–53.
  18. Grishin V. Yu. Network-centric warfare and survivability of its control system. Part 2 / V. Yu. Grishin, A. V. Lobanov, V. G. Sirenko // New Defence Order. Strategy. – 2014. – No. 3 (30). – P. 46–49.
  19. Barborak M. The consensus problem in fault-tolerant computing / M. Barborak, A. Dahbura, M. Malek // ACM Computing Surveys (CSUR). – 1993. – Vol. 25. – Issue 2. – P. 171–220.
  20. Lamport L. The byzantine generals problem / L. Lamport, R. Shostak, M. Pease // ACM Trans. Progr. Lang. and Syst. – 1982. – Vol. 4. – No. 3. – P. 382–401.

*Irina Vladimirovna Asharina, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor,  
Senior Researcher, e-mail: asharinairina@mail.ru*

*Vyacheslav Yuryevich Grishin, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), First Deputy Director General,  
Chief Designer, e-mail: grishin@se.zgrad.ru*

*Vladimir Grigoryevich Sirenko, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Professor,  
Deputy Director General for Advanced Projects, e-mail: vgsirenko@mail.ru  
(Joint-Stock Company «Scientific Research Institute «Submicron»).*