

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ

DESIGN AND TECHNOLOGY IN INSTRUMENTATION AND RADIO ELECTRONICS

УДК 519.873

doi:10.21685/2307-4205-2022-1-8

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ИЗБЫТОЧНОЙ СИСТЕМЫ ПОСРЕДСТВОМ СУПЕРВИЗОРОВ КОНФИГУРАЦИЙ

А. М. Агеев¹, В. Н. Буков²

¹ Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, Воронеж, Россия

² Научно-исследовательский институт авиационного оборудования, Жуковский, Россия

¹ ageev_bbc@mail.ru, ² v_bukov@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Путь к созданию высоконадежной техники, каждая отдельная часть которой в силу ряда факторов обладает ограниченной надежностью, заключается в разработке реконфигурируемых систем с избыточным числом разнородных компонентов. Задачей статьи является изложение особенностей развиваемого авторами подхода к управлению избыточностью на основе супервизоров конфигураций, а также анализ достигаемых при этом результатов. *Материалы и методы.* Излагаются принципиальные особенности подхода к управлению избыточностью технических систем с использованием супервизоров конфигураций, заключающиеся в обособлении всех средств поддержки каждой конфигурации, а также применении процедур парного арбитража конфигураций и вычислителей. Такой арбитраж позволяет по формируемым матрицам предпочтения выбирать из числа располагаемых вычислителей и конфигураций такие, которые обладают гарантированной исправностью и при необходимости другими преимуществами перед альтернативами. С использованием анализа структурных схем и расчетов основных характеристик отказоустойчивости проводится оценка эффективности подхода в сравнении с известными подходами к управлению резервированием. *Результаты.* Сравнение предложенной схемы системы управления избыточностью со схемами известных подходов показало ощутимое преимущество. *Выводы.* Использование высоконадежной системы управления избыточностью предложенного типа позволит реализовывать требуемые уровни надежности бортовых комплексов с избыточным числом разнородных ресурсов.

Ключевые слова: комплекс бортового оборудования, оценка надежности, резервирование, реконфигурирование, управление избыточностью, супервизор конфигурации

Для цитирования: Агеев А. М., Буков В. Н. Эффективность резервирования избыточной системы посредством супервизоров конфигураций // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 1. С. 67–82. doi:10.21685/2307-4205-2022-1-8

EFFICIENCY OF REDUNDANT SYSTEM THROUGH CONFIGURATION SUPERVISORS

A.M. Ageev¹, V.N. Bukov²

¹ N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy, Voronezh, Russia

² Research Institute of Aviation Equipment, Zhukovsky, Russia

¹ ageev_bbc@mail.ru, ² v_bukov@mail.ru

Abstract. *Background.* The path to the creation of highly reliable equipment, each separate part of which, due to several factors, has limited reliability, is to develop reconfigurable systems with an excessive number of heterogeneous components. The objective of the article is to summarize the characteristics of the authors of the approach to managing redundancy based on configuration supervisors, as well as the analysis of the results achieved. *Materials and methods.* The principal features of the approach to the reduction management of technical systems using configuration supervisors, which consist in the separation of all means of supporting each configuration, as well as the use of paired arbitration procedures for configurations and computers. Such arbitration allows for the preferences formed preference matrices from among the disposable computers and configurations such that have guaranteed health and, if necessary, other advantages over alternatives. Using the analysis of structural schemes and calculations of the basic characteristics of fault tolerance, an assessment of the effectiveness of the approach in comparison with the well-known approaches to reservation management is carried out. *Results.* Comparison of the proposed system of redundancy management system with schemes of known approaches showed a tangible advantage. *Conclusions.* The use of a highly reliable redundancy management system of the proposed type will allow the required levels of reliability of onboard complexes with an excessive number of heterogeneous resources.

Keywords: onboard complex, reliability assessment, redundancy, reconfiguration, redundancy management, configuration supervisor

For citation: Ageev A.M., Bukov V.N. Efficiency of redundant system through configuration supervisors. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(1):67–82. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-1-8

Введение

Системы с управляемой избыточностью [1, 2], а в другой терминологии саморемонтируемые или самовосстанавливаемые [3], реконфигурируемые [4], реструктурируемые [5], самопроектируемые и отказоустойчивые [6] системы, вызывают все более возрастающий интерес как в научных, так и в конструкторских кругах. Сегодня уже не вызывает сомнения, что разработка такого рода систем – это путь к созданию высоконадежной техники, каждая отдельная часть которой в силу действия технических, технологических, экономических и других факторов обладает ограниченной надежностью.

Наряду с крупномасштабными сетевыми и технологическими системами в последние десятилетия стала превалировать тенденция к преднамеренной избыточности создаваемых комплексов бортового оборудования (КБО) подвижных технических объектов различного назначения (наземных, морских, авиационных). Сказанное, в частности, иллюстрирует многообразие направлений соответствующих исследований и сформулированных решений для достижения заданной отказоустойчивости [7–10] техники.

Задачей настоящей статьи является краткое изложение особенностей развиваемого авторами подхода к повышению отказоустойчивости систем с управляемой избыточностью на основе супервизоров конфигураций [11–14], а также анализ достигаемых при этом результатов и их сопоставление с результатами других известных подходов.

Особенности подхода с супервизорами конфигураций

Избыточный КБО, рассматриваемый здесь как объект управления избыточностью¹, содержит:

а) избыточное число в общем случае разнородных (различные интерфейсы) и неуниверсальных (различные функциональные возможности) аппаратных и/или программных компонентов, как правило, со встроенными средствами контроля (ВСК);

б) распределенную бортовую интегрированную вычислительную среду (БИВС), образующую единое информационное пространство, в составе:

- бортовой центральной вычислительной системы (БЦВС) с резервированными вычислителями, объединенными центральной сетью,
- периферийных систем и устройств с локализованными в них вычислительными средствами, часто профильного назначения и с обусловленными этим особенностями,

¹ Под управлением избыточностью предложено понимать целенаправленное управление включением/исключением в/из работы избыточных ресурсов комплекса оборудования с целью обеспечения отказоустойчивости, функциональной реконфигурации и адаптации к условиям его работы и выполняемым задачам.

– коммуникационных средств (коммутаторы, концентраторы, шины), выполняющих доставку данных к распределенным аппаратным составляющим;

в) программные средства управления избыточностью, реализующие функции идентификации и безопасного парирования (путем маскирования или реконфигурирования) возникающих в КБО и БИВС отказов, сбоев и программных ошибок.

Развиваемый подход к управлению избыточностью предусматривает наличие самодостаточных программных объектов (программных модулей) по числу заранее просчитанных конфигураций, как показано на рис. 1. Каждый такой объект, функционирующий в составе системы управления избыточностью и называемый *супервизором конфигурации* (СК), периодически осуществляет мониторинг готовности включенных в конфигурацию компонентов K_i , участвует в арбитраже между всеми СК с целью выбора доминирующего СК (ДСК), соотношенного с предпочтительной конфигурацией, и управляет реализацией этой конфигурации в случае победы в арбитраже.

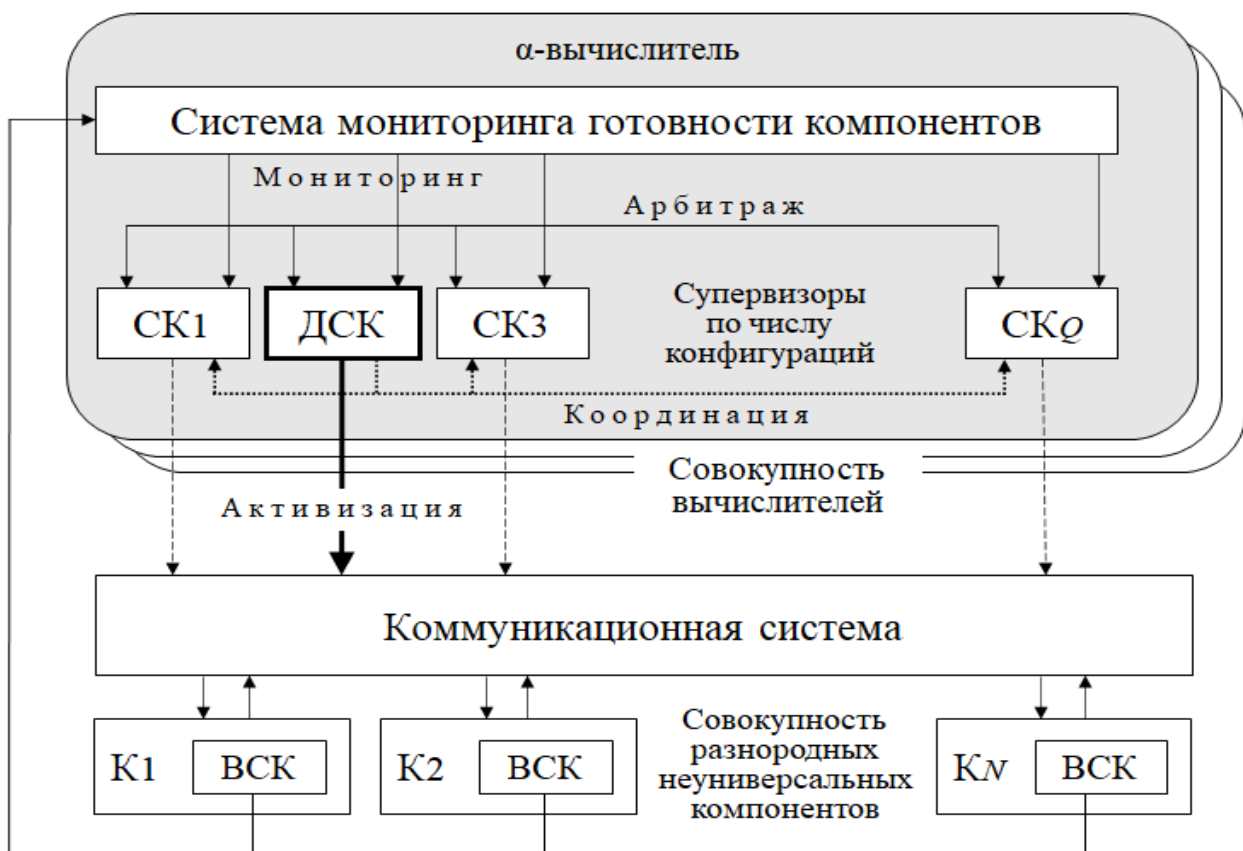


Рис. 1. Место и роль супервизоров конфигураций в архитектуре КБО

Одинаковый набор супервизоров по числу непротиворечивых конфигураций формируется на этапе проектирования и размещается во всех выделенных под задачи управления избыточностью вычислителях БЦВС.

Арбитраж является ключевым ядром в вопросе повышения отказоустойчивости системы, основанной на СК в целом. Он состоит из связанных между собой парного арбитража конфигураций (ПАК), где выбирается ДСК [13], и парного арбитража вычислителей (ПАВ), в результате которого выбирается α -вычислитель, реализующий ДСК и предпочтительную конфигурацию. Принципиально то, что организация парного арбитража позволяет одновременно выбрать предпочтительный объект арбитража и указать (по обстоятельствам окончательно или предположительно) имеющие место ошибки средств выполнения арбитража (самодиагностика средств диагностики).

Арбитраж вычислителей

В процессе выполнения ПАВ два вычислителя пары, выбираемой на предварительном этапе, независимо формируют так называемую матрицу предпочтений (МП)

$$D_{\text{ПАВ}} = \begin{pmatrix} & \text{СКa1} & \text{СКa2} \\ \text{СКк1} & \begin{bmatrix} d_1^1 & d_1^2 \end{bmatrix} \\ \text{СКк2} & \begin{bmatrix} d_2^1 & d_2^2 \end{bmatrix} \end{pmatrix},$$

где d_i^j – бинарный индекс предпочтения i -го вычислителя (работоспособность, готовность и отсутствие ошибок конфигураций $\text{СКк}i$), определенный анализатором $\text{СКa}j$, размещенным в j -м вычислителе: «1» – есть предпочтение, «0» – нет предпочтения.

Согласно табл. 1 значениям $D_{\text{ПАВ}}$ ставятся в соответствие определенные предпочтения вычислителей пары. В общей сложности 16 различных значений $D_{\text{ПАВ}}$ в 13 случаях позволяют однозначно выбрать предпочтительный вычислитель (группы значений I, II, III), а в 3 соответствуют отрицательному завершению арбитража, не разрешаемому средствами ПАВ (группа значений IV, поднятая серым цветом).

Таблица 1

Значения матрицы предпочтений при ПАВ

Группа значений	Предпочтения выбора α-вычислителя	Ошибки анализатора				отсутствуют
		СКa1		СКa2		
		ложная «1»	ложный «0»	ложная «1»	ложный «0»	
I	вычислитель 1	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$
II	вычислитель 2	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$
III	любой	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}^*$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}^*$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}^*$
IV	никакой	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$				

*Допускается любая из представленных комбинаций ошибок.

Значения $D_{\text{ПАВ}}$ из группы IV требуют одновременной замены пары вычислителей и повторения арбитража или использования других способов распределения предпочтений.

Арбитраж конфигураций

В процессе выполнения ПАК в выбранном α -вычислителе попарно анализируются доступные (заблаговременно рассчитанные) конфигурации с формированием соответствующих МП

$$Q_{\text{ПАК}} = \begin{pmatrix} & \text{MA1} & \text{MA2} \\ \text{OA1} & \begin{bmatrix} q_1^1 & q_1^2 \end{bmatrix} \\ \text{OA2} & \begin{bmatrix} q_2^1 & q_2^2 \end{bmatrix} \end{pmatrix},$$

где q_i^j – бинарный индекс предпочтения i -го объекта арбитража (OA), определенный модулем арбитража (MA) j -го СК в α -вычислителе: «1» – есть предпочтение, «0» – нет предпочтения. Под объектом арбитража понимаются следующие сравниваемые характеристики конфигурации:

- индекс готовности (ИГ), формируемый по данным мониторинга ВСК компонентов и характеризующий исправность всех компонентов конфигурации и связей между ними, загрузку и инициализацию необходимых программ и т.п.;

- показатель функциональной эффективности (ПФЭ), интегрально характеризующий сравниваемые свойства конфигурации (эффективность, точность, экономичность и др.);

- идентификатор конфигурации.

Рассмотрим случай, допускающий в отличие от ПАВ углубленную оценку двух конфликтных ситуаций путем взаимной замены входов МА конкурирующей пары супервизоров и проведение повторного арбитража на 2-м акте, как показано в табл. 2.

Таблица 2

Значения матрицы предпочтений при ПАК

Группа значений	Предпочтения СК	1 акт						2 акт	
		Ошибки анализатора МА					Конфликты 1 акта	Ошибки анализатора МА	
			МА1		МА2			МА1	МА2
		отсутствует	ложная «1»	ложный «0»	ложная «1»	ложный «0»		ложный «0»	ложный «0»
I	СК1	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$
II	СК2	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$
III	никакой	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$							

Результатами ПАК являются 16 различных значений $Q_{\text{ПАК}}$, включая два конфликтных значения по итогам 1-го акта арбитража, которые успешно разрешаются на 2-м акте. По 12 из них делается однозначный выбор предпочтительной конфигурации, удовлетворяющей обобщенным требованиям (полная готовность к работе и наилучший ПФЭ), а 4 значения (подняты серым цветом) соответствуют конфликтам, неразрешимым средствами ПАК.

В последнем случае проводится процедура ПАК в другой паре СК. При этом конфликтующие супервизоры могут участвовать в арбитраже последующих циклов.

Схемы управления избыточностью систем

Из всего многообразия избыточных технических систем рассмотрим варианты, с одной стороны, адаптированные к различным подходам повышения их отказоустойчивости, а с другой стороны, позволяющие провести сравнительный анализ достигаемого эффекта. Обращаем внимание, что центром внимания является комплекс оборудования, образованный объединением в общем случае неоднородных и неуниверсальных компонентов. Вычислительные или другие средства в части управления избыточностью играют в рассматриваемом контексте обеспечивающую роль, в дальнейших рассуждениях будем обобщенно относить их к системе управления избыточности (СУИ).

Схема А. Резервирование конфигурации целиком

Одним из первых освоенных путей парирования отказов является резервирование конфигураций целиком, известное как технология общего резервирования [15, 16]. Соответствующая схема приведена рис. 2, все аппаратные и программные¹ компоненты разбиты на группы ресурсов K_i , $i = \overline{1, K}$, каждая из которых содержит компоненты $k_{i,j}$, $j = \overline{1, N_i}$.

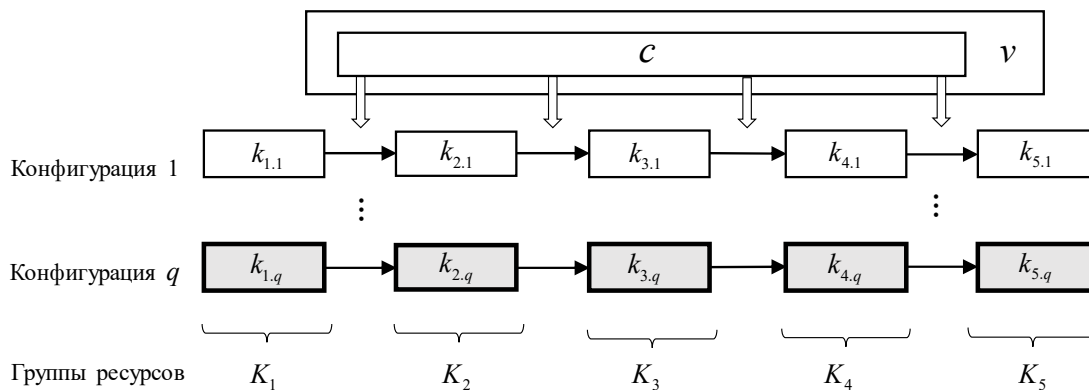


Рис. 2. Схема А резервирования конфигураций целиком

¹ Речь идет о программах, обеспечивающих функционирование конфигурации, а не связанных с управлением избыточностью.

Без потери общности здесь и в дальнейшем будем полагать, что каждая конфигурация $q = \overline{1, Q}$ содержит по одному компоненту $k_{i,q}$ из каждой группы ресурсов K_i . Таким образом, для очередной конфигурации требуется новый набор всех типов ресурсов, используемых системой для выполнения ее функций. Логическая система выбора конфигурации (управления избыточностью) c , размещенная в вычислителе v , является, как правило, не резервируемой.

Очевидными недостатками является высокая затратность по компонентам и низкий уровень вариативности (гибкости использования располагаемых компонентов). Примером систем с общим резервированием является предложение по разработке систем ориентации спутников Земли [15].

Схемы Б. Покомпонентное резервирование

Наиболее очевидным и часто используемым путем парирования отказов технических устройств является раздельное покомпонентное резервирование [13, 14], т.е. прямое применение автономной избыточности в пределах пространственно и функционально ограниченных фрагментов (подсистем, узлов, деталей, модулей) системы.

При этом в зависимости от особенностей системы и возможностей коммутационного оборудования различают схемы с явным наличием узких мест (bottleneck – bn), когда присутствуют не резервируемые пограничные части [16], как показано на рис. 3, и с более сложными коммутациями типа «каждый с каждым», показанными на рис. 4. В том и другом случаях управление ресурсами осуществляется независимо в каждой группе K_i посредством локальных реконфигурирующих органов l_i .

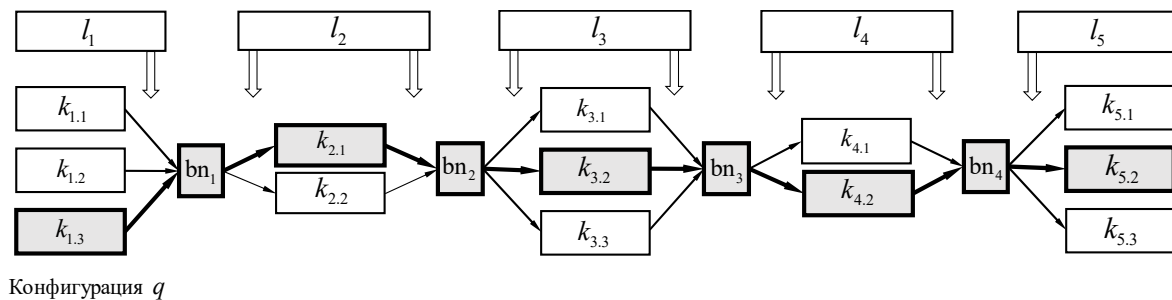


Рис. 3. Схема Б1 покомпонентного резервирования с наличием узких мест

Последняя из схем – логичный шаг в развитии современных цифровых информационно-управляющих систем и является основой для построения интегрированной модульной авионики (ИМА) [17]. Такой вариант межкомпонентных коммуникаций предлагается использовать в дальнейшем, в том числе и в предлагаемом подходе с супервизорами конфигураций.

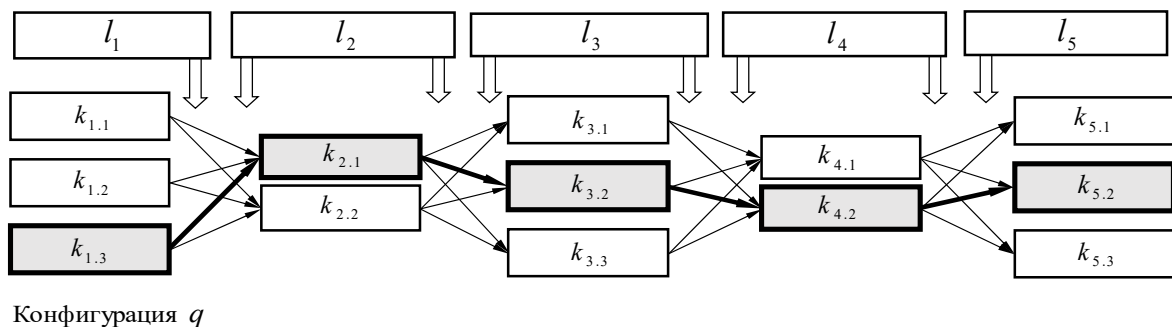


Рис. 4. Схема Б2 покомпонентного резервирования со связями типа «каждый с каждым»

Преимущество покомпонентного резервирования состоит в высоком уровне вариативности, однако общим недостатком является ограниченность применения исключительно для конструктивно и функционально одинаковых компонентов. Возникает вопрос о резервировании локальных систем управления ресурсами l_i . Кроме того, неразрешимой может оказаться задача оптимизации (рационализации) системы целиком в условиях изменения ее компонентов.

Схема В. Централизованное (супервизорное) управление

Дальнейшее развитие цифровых технологий привело к созданию централизованных схем резервирования под управлением бортовых цифровых вычислительных машин (БЦВМ) [18], собирательно называемых супервизорными и иллюстрируемых рис. 5, где s – супервизор как централизованная разновидность СУИ, размещенный в вычислителе v .

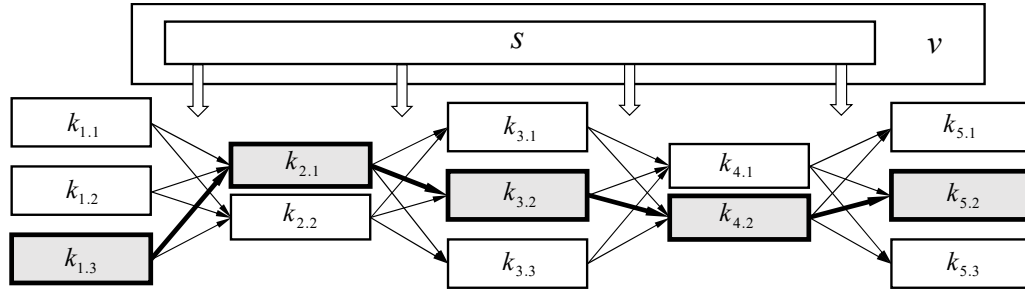
Конфигурация q

Рис. 5. Схема В централизованного управления конфигурациями

Достоинствами такой схемы являются существенная экономия ресурсов, гибкость за счет централизации мониторинга и управления реконфигурацией, а также возможность выдерживания единой стратегии функционирования всей системы. Ключевым недостатком является уязвимость, поскольку супервизор s является узким местом в смысле надежности, отказ которого приводит к потере работоспособности всей системы.

Схема Г. Мультиагентное управление конфигурациями

Преодоление недостатков централизованного управления видится в резервировании супервизора и содержащего его вычислителя. В работе [8] изложены обоснование и основные положения соответствующего подхода, названного мультиагентным, суть которого заключается в распределении функции управления резервированием между совокупностью локальных диспетчеров d_r (они же агенты), размещенных в каждом из вычислителей v_r (возможно резервирование узлов или модулей в одном вычислителе), в совокупности образующих распределенную систему.

Следует отметить, что разработанный подход [8] ориентирован исключительно на вычислительную сеть (совокупность вычислителей v_r), характеризуемую высокими уровнями как однородности (одинаковые возможности взаимодействия), так и универсальности (одинаковые возможности выполнения функций) составных частей. Это является основой для автоматизации перераспределения задач в сети. Непосредственно к комплексу КБО такое решение не имеет прямого отношения, однако реальные компоненты $k_{i,j}$ комплекса могут подразумеваться в качестве специфической периферии мультиагентной системы.

Будем представлять мультиагентный подход схемой на рис. 6, где каждый локальный диспетчер d_r размещен в отдельном вычислителе v_r , $r = \overline{1, R}$.

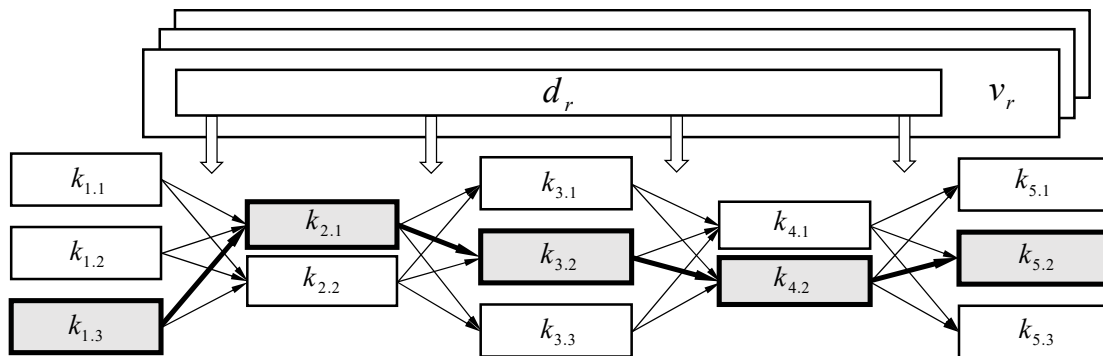
Конфигурация q

Рис. 6. Схема Г мультиагентного управления конфигурациями

Каждый локальный диспетчер самостоятельно решает вопрос контроля своей исправности, информируя о результате остальные диспетчеры. В результате согласованной работы всех локальных диспетчеров d_r , идентифицируемых как исправные, осуществляется оперативное перераспределение используемых ресурсов. Сами вычислители резервируются каким-либо традиционным способом.

Схема Д. Резервирование с супервизорами конфигураций

Предлагаемая авторами схема, иллюстрируемая рис. 7, в определенной мере унаследовала различные особенности схем А, Б2, В и Г. Программный объект s_q^r , названный супервизором конфигурации, соотнесен с одной q -й заранее просчитанной конфигурацией, $q = \overline{1, Q}$, и размещен в каждом вычислителе v_r , $r = \overline{1, R}$, участвующем в управлении избыточностью.

В этом заключается главная особенность подхода: СУИ резервируется на уровне вычислителей и на уровне супервизоров – «представителей» своих конфигураций. Кроме того, выбор как предпочтительного α -вычислителя, так и ДСК для реализации предпочтительной конфигурации осуществляется с использованием описанных в разделе 1 процедур парного арбитража.

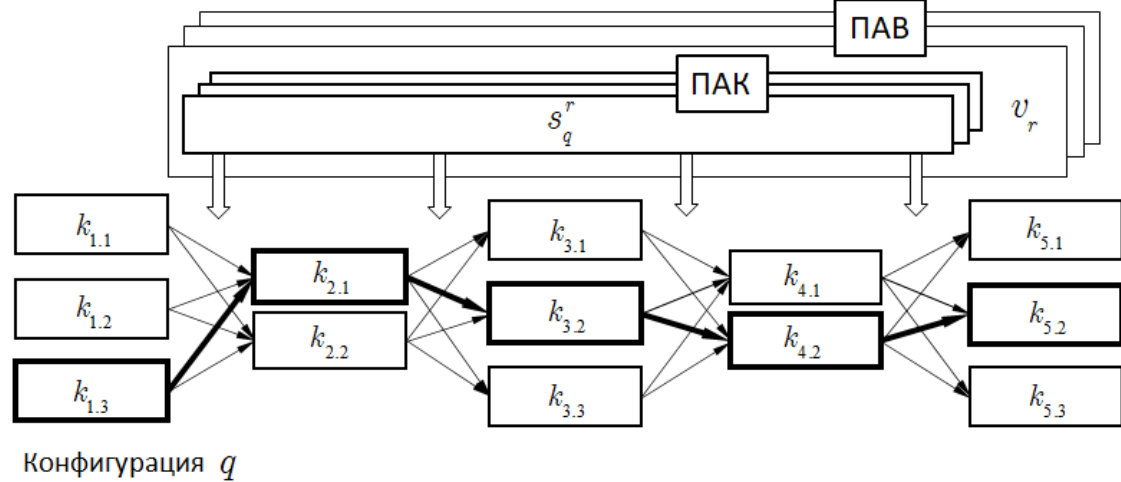


Рис. 7. Схема Д резервирования с использованием супервизоров конфигураций

Оценивание отказоустойчивости схем резервирования

Логические условия работоспособности КБО применительно к описанным схемам резервирования сведены в табл. 3.

Таблица 3

Условия работоспособности КБО

Схема резервирования		Условие работоспособности всего комплекса
1		2
А	Резервирование конфигураций целиком	исправность хотя бы одной конфигурации (исправность всех ее компонентов) И исправность схемы выбора конфигурации
Б.1	Покомпонентное резервирование с «узким местом»	исправность хотя бы одного компонента в каждой группе резерва И исправность всех «узких мест» И исправность всех логических систем управления резервом
Б.2	Покомпонентное резервирование с соединениями «каждый с каждым»	исправность хотя бы одного компонента в каждой группе резерва И исправность всех логических систем управления

Окончание табл. 3

1		2
В	Резервирование с централизованной системой (супервизор)	исправность хотя бы одного компонента в каждой группе резерва И исправность центрального вычислителя И исправность управляющей программы супервизора
Г	Мультиагентное управление конфигурациями	исправность хотя бы одного компонента в каждой группе резерва И исправность хотя бы одного вычислителя И исправность агента в исправном вычислителе
Д.	Резервирование с супервизорами конфигураций	исправность хотя бы одного вычислителя И исправность хотя бы одного СК в этом вычислителе И исправность всех компонентов конфигурации, соотнесенной с этим СК

Принимая упрощающее предположение о том, что исправности всех составляющих рассматриваемых схем являются независимыми событиями, и вводя обозначения вероятности безотказной работы (далее – вероятности исправности), введенных в разделе 2 составляющий схем: $P(v_r)$ – вероятность исправности r -го вычислителя, $P(k_{i,j})$ – вероятность исправности j -го компонента в i -й группе ресурсов и т.д., можно записать следующие итоговые расчетные формулы:

Формулы вероятности исправности КБО:

для схемы А

$$P_A(\text{КБО}) = \underbrace{\left(1 - \prod_{q=1}^Q \left(1 - \prod_{i=1}^K P(k_{i,q}) \right) \right)}_{\text{Исправность хотя бы одной конфигурации}} \underbrace{P(v)P(c)}_{\text{Исправность СУИ}}, \quad (1)$$

для схемы Б1

$$P_{Б.1}(\text{КБО}) = \prod_{i=1}^K \left(\underbrace{\left(1 - \prod_{j=1}^{N_i} (1 - P(k_{i,j})) \right)}_{\text{Исправность компонентов в группе}} \underbrace{P(l_i)P(\text{bn}_{i-1})}_{\text{Исправность СУИ}} \right), \quad (2)$$

где по определению $P(\text{bn}_0) = 1$,

для схемы Б2

$$P_{Б.2}(\text{КБО}) = \prod_{i=1}^K \left(\underbrace{\left(1 - \prod_{j=1}^{N_i} (1 - P(k_{i,j})) \right)}_{\text{Исправность компонентов в группе}} \underbrace{P(l_i)}_{\text{Исправность СУИ}} \right), \quad (3)$$

для схемы В

$$P_B(\text{КБО}) = \prod_{i=1}^K \left(\underbrace{\left(1 - \prod_{j=1}^{N_i} (1 - P(k_{i,j})) \right)}_{\text{Исправность компонентов}} \underbrace{P(v)P(s)}_{\text{Исправность СУИ}} \right), \quad (4)$$

для схемы Г

$$P_G(\text{КБО}) = \underbrace{\prod_{i=1}^K \left(1 - \prod_{j=1}^{N_i} (1 - P(k_{i,j})) \right)}_{\text{Исправность компонентов}} \underbrace{\left(1 - \prod_{r=1}^R (1 - P(v_r)P(d_r)) \right)}_{\text{Исправность СУИ}}, \quad (5)$$

для схемы Д без учета арбитража

$$P_D(\text{КБО}) = 1 - \prod_{q=1}^Q \left(1 - \underbrace{\prod_{i=1}^K P(k_{i,j/q})}_{\text{Исправность компонентов } q\text{-й конфигурации}} \underbrace{\left(1 - \prod_{r=1}^R (1 - P(v_r)P(s_q^r)) \right)}_{\text{Исправность СУИ в части } q\text{-й конфигурации без учета арбитража}} \right), \quad (6)$$

где $P(k_{i,j/q})$ – j -й компонент (при вычислении не учитывается) в i -й группе ресурсов, используемый в q -й конфигурации,

для схемы Д с учетом арбитража

$$P_{D+}(\text{КБО}) = 1 - \prod_{q=1}^Q \left(1 - \prod_{i=1}^K P(k_{i,j/q}) \underbrace{\left(1 - \prod_{r=1}^R (1 - \hat{P}(v_r)\hat{P}(s_q^r)) \right)}_{\text{Исправность СУИ в части } q\text{-й конфигурации с учетом арбитража}} \right), \quad (7)$$

где $\hat{P}(v_r)$ – скорректированная вероятность исправности вычислителя, прошедшего процедуру ПАВ, $\hat{P}(s_q^r)$ – скорректированная вероятность исправности ДСК, прошедшего процедуру ПАК.

Дополнительно отметим, что:

а) максимально возможное число различных конфигураций, получаемое путем коммутации имеющегося набора компонентов, будет определяться как

$$Q_{\max} = \prod_{i=1}^N N_i,$$

хотя в действительности число конфигураций может быть меньше этого значения: $Q \leq Q_{\max}$;

б) составляющая

$$\prod_{i=1}^K \left(1 - \prod_{j=1}^{N_i} (1 - P(k_{i,j})) \right) \quad (8)$$

в формулах для схем Б, В, Г и Д представляет собой максимально возможную надежность располагаемой совокупности компонентов;

в) предполагается, что в схеме Д все компоненты комплекса «охвачены» конфигурациями (каждый компонент задействован хотя бы в одной из них).

Учет эффекта парного арбитража

Корректировка вероятностей в формуле (7) обусловлена следующей принципиальной особенностью схемы Д. Если в других схемах каждый вычислитель v_r , равно как и логическая схема управления избыточностью, самостоятельно решает вопрос о собственной исправности¹ и исправности компонентов, то схема Д предусматривает процедуры парного арбитража вычислителей (ПАВ) и конфигураций (ПАК), заключающиеся в независимой перекрестной проверке исправности v_r в первом и s_q^r во втором случаях с последующим совместным анализом результатов.

Расширить статистический анализ по формуле (6) на случай использования логических функций, каковыми являются ПАВ и ПАК, весьма сложно. Предлагаемый вариант позволяет получить упрощенную оценку.

В табл. 4 в соответствии с табл. 1 представлены 16 различных исходов (значений МП) процедуры ПАВ, соотнесенных по отсутствию или наличию различных ошибок анализаторов, разбитые² на следующую полную группу независимых событий:

¹ Факт неисправности вычислителя соответствует отсутствию подтверждения его исправности [8].

² Три исхода с предпочтением любого вычислителя условно поделены поровну между событиями «анализаторы исправны» и «ошибки анализаторов, не отражающиеся на выборе предпочтения».

- событие α – отсутствие ошибок анализаторов обоих вычислителей – всего 3,5 исхода;
- событие β – наличие одной ошибки в двух анализаторах, не отражающейся на предпочтении вычислителя – всего 9,5 исходов;
- событие γ – наличие комбинации ошибок в двух анализаторах, исключающих предпочтение какого-либо вычислителя – всего 3 исхода.

Таблица 4

Вероятности и частоты исходов ПАВ

Событие	Число исходов	Результат выбора	Состояние анализаторов ПАВ			
			характеристика	вероятность события		абсолютная частота
α	2	однозначный	исправны	$P(a)$		3,5
	3	любой				
β	8	однозначный	одна ошибка	$1 - P(a)$	$\frac{9,5}{12,5}(1 - P(a))$	9,5
					$\frac{3}{12,5}(1 - P(a))$	3
γ	3	никакой	комбинация ошибок			
Всего:	16			1	16	

Будем считать, что исправность обоих анализаторов в паре вычислителей как одно сложное (3,5 исхода) событие α характеризуется вероятностью $P(a)$. Тогда, как показано в табл. 4, сложное событие $\beta + \gamma$ как любая комбинация ошибок анализаторов происходит с вероятностью $1 - P(a)$, где $P(a)$ – вероятность исправности анализатора в ПАВ (и МА в ПАК).

Вероятность сложного события $\beta + \gamma$ разделим между составляющими его независимыми событиями β и γ пропорционально относительным частотам исходов 9,6/12,5 и 3/12,5 соответственно.

Теперь определим усредненную вероятность исправности вычислителя после процедуры ПАВ. С учетом независимости событий α , β и γ , а также того, что при 13 исходах (события α и β) гарантирована исправность $P(v_r) = 1$, а при 3 исходах (событие γ) она остается изначальной $P(v_r)$, получаем расчетную формулу

$$\hat{P}(v_r) = \underbrace{P(a)}_{P(\alpha)} \cdot 1 + \underbrace{\frac{9,5}{12,5}(1 - P(a))}_{P(\beta)} \cdot 1 + \underbrace{\frac{3}{12,5}(1 - P(a))}_{P(\gamma)} \cdot P(v_r),$$

в которой первое слагаемое отражает вероятность исправности анализатора, второе – вероятность неисправности анализатора при исправном вычислителе, третье – вероятность неисправности анализатора при неисправном вычислителе.

Итоговая формула для расчета вероятности исправности вычислителя с учетом ПАВ:

$$\hat{P}(v_r) = \frac{19}{25} + \frac{6}{25} P(a) + \frac{6}{25} (1 - P(a)) P(v_r). \quad (9)$$

Таблица 5

Вероятности и частоты исходов ПАК

Событие	Число исходов	Результат выбора	Состояние МА		
			характеристика	вероятность события	абсолютная частота
α	4	однозначный	исправны	$P(a)$	4
β	8	однозначный	одна ошибка	$\frac{8}{12}(1 - P(a))$	8
γ	4	никакой	комбинация ошибок	$\frac{4}{12}(1 - P(a))$	4
Всего:	16			1	

Исходя из аналогичных рассуждений и основываясь на табл. 2, можно записать формулу

$$\hat{P}(s_q^r) = P(a) + \frac{8}{12}(1 - P(a)) + \frac{4}{12}(1 - P(a))P(s_q^r) = \frac{2}{3} + \frac{1}{3}P(a) + \frac{1}{3}(1 - P(a))P(s_q^r), \quad (10)$$

соответствующую табл. 5 и определяющую вероятность исправности СК после процедуры ПАК.

Упрощение вычислений вероятности для схемы Д

Специального обсуждения заслуживает сложность вычисления в формулах (6) и (7) произведения с варьированием номера конфигурации q . Поскольку одни и те же компоненты $k_{i,j/q}$ могут использоваться в различных конфигурациях, то перечисляемые по номеру q конфигурации в смысле отказов не могут считаться независимыми. Независимый по предположению отказ какого-либо компонента с номерами i (номер группы) и j (номер в группе) приводит к одновременному отказу определенной совокупности конфигураций.

В силу сказанного учет в общем виде того, что исправность СУИ, во-первых, и исправность совокупности компонентов, во-вторых, должны относиться к одной и той же конфигурации, требует более глубокого анализа. Такой анализ связан с необходимостью учета количественного и качественного состава конфигураций, индивидуального для конкретных реализаций КБО, и в обобщенной постановке едва ли возможен.

Если же зависимость исправности СУИ и компонентов в рамках каждой конфигурации игнорируется, то для завышенных оценок исправности (6) и (7) в первом приближении можно по аналогии с формулой (5) записать

$$\tilde{P}_D(\text{КБО}) = \underbrace{\prod_{i=1}^K \left(1 - \prod_{j=1}^{N_i} (1 - P(k_{i,j})) \right)}_{\text{Исправность компонентов}} \underbrace{\left(1 - \prod_{r=1}^R \left(1 - P(v_r) \left(1 - \prod_{q=1}^Q (1 - P(s_q^r)) \right) \right) \right)}_{\text{Исправность СУИ}}, \quad (11)$$

$$\tilde{P}_{D+}(\text{КБО}) = \prod_{i=1}^K \left(1 - \prod_{j=1}^{N_i} (1 - P(k_{i,j})) \right) \left(1 - \prod_{r=1}^R \left(1 - \hat{P}(v_r) \left(1 - \prod_{q=1}^Q (1 - \hat{P}(s_q^r)) \right) \right) \right). \quad (12)$$

Оценки (11) и (12) являются завышенными, поскольку одновременное наличие исправных компонентов хотя бы одной конфигурации и хотя бы одной копии СУИ (r -й вычислитель и q -й СК в нем) не обязательно относится к одной и той же конфигурации.

Числовой пример

С целью сравнительного анализа схем управления избыточностью рассматривается гипотетический КБО с различными вариантами СУИ, соответствующими рассматриваемым схемам А – Д, и следующими исходными данными:

число групп резерва $K = 5$,

количество компонентов в группах:

вариант 1: $N_1 = N_3 = N_5 = 3$, $N_2 = N_4 = 2$,

вариант 2: $N_1 = N_3 = N_5 = 6$, $N_2 = N_4 = 5$,

число вычислителей $r = 3$,

вероятности безотказной работы:

компонентов $P(k_{i,j}) = 0,99$,

вычислителей $P(v) = P(v_r) = 0,999$,

резервирующих органов $P(c) = P(l_i) = P(s) = P(s_q) = 0,999$, $i = \overline{1,5}$, $q = \overline{1,Q}$,

«узких мест» $P(bn_i) = 0,999$, $i = \overline{1,4}$,

анализаторов ПАК и ПАВ $P(a) = 0,99$.

Принятые значения показателей надежности частей схем носят методический характер. Результаты вычислений представлены в табл. 6 и 7.

Таблица 6

Показатели отказоустойчивости КБО, вариант 1: (1–2)-кратный резерв в пяти группах компонентов

Схема	Расчетная формула	Надежность СУИ		Надежность КБО	
		Интенсивность отказов	Вероятность исправности	Интенсивность отказов	Вероятность исправности
А	(1)	$1,9989 \cdot 10^{-3}$	0,998	$1,9989 \cdot 10^{-3}$	0,998
Б1	(2)	$8,9641 \cdot 10^{-3} *$	0,991 *	$9,1653 \cdot 10^{-3}$	0,991
Б2	(3)	$4,9901 \cdot 10^{-3} *$	0,995 *	$5,1920 \cdot 10^{-3}$	0,995
В	(4)	$1,9989 \cdot 10^{-3}$	0,998	$2,2016 \cdot 10^{-3}$	0,998
Г	(5)	$7,9880 \cdot 10^{-9}$	0,999999992	$2,02997 \cdot 10^{-4}$	0,9998
Д	(11)	$9,9999 \cdot 10^{-10}$	0,999999999	$2,02990 \cdot 10^{-4}$	0,9998
Д+	(12)	$1,3824 \cdot 10^{-17}$	0,9999999999999999	$2,02989 \cdot 10^{-4}$	0,9998
max	(8)	0	1	$2,02989 \cdot 10^{-4}$	0,9998

* Представлены обобщенные вероятности совокупности резервирующих компонентов.

Таблица 7

Показатели отказоустойчивости КБО, вариант 2: (4–5)-кратный резерв в пяти группах компонентов

Схема	Расчетная формула	Надежность СУИ		Надежность КБО	
		Интенсивность отказов	Вероятность исправности	Интенсивность отказов	Вероятность исправности
А	(1)	$1,9989 \cdot 10^{-3}$	0,998	$1,9989 \cdot 10^{-3}$	0,998
Б1	(2)	$8,9641 \cdot 10^{-3} *$	0,991 *	$8,9641 \cdot 10^{-3}$	0,991
Б2	(3)	$4,9901 \cdot 10^{-3} *$	0,995 *	$4,9990 \cdot 10^{-3}$	0,995
В	(4)	$1,9989 \cdot 10^{-3}$	0,998	$1,9990 \cdot 10^{-3}$	0,998
Г	(5)	$7,9880 \cdot 10^{-9}$	0,999999992	$8,1910 \cdot 10^{-9}$	0,999999991
Д	(11)	$9,9999 \cdot 10^{-10}$	0,999999999	$1,2030 \cdot 10^{-9}$	0,999999999
Д+	(12)	$1,3824 \cdot 10^{-17}$	0,9999999999999999	$2,02999 \cdot 10^{-10}$	0,9999999998
max	(8)	0	1	$2,02999 \cdot 10^{-10}$	0,9999999998

* Представлены обобщенные вероятности совокупности резервирующих компонентов.

Обсуждение результатов

Анализ табл. 6 показывает, что схемы А, Б1, Б2 и В обладают практически одинаковыми вероятностями исправности СУИ, в то время как схема Г характеризуется отказоустойчивостью СУИ на 5 порядков больше (число девяток в вероятности исправности), схема Д без арбитража – еще на порядок, а схема Д+ с арбитражем – еще более, чем на два порядка¹. Для сравнения в строке «max» указаны характеристики надежности при абсолютно надежной СУИ, которые соответствуют максимально достижимой надежности располагаемого набора компонентов, определяемой выражением (8).

Значительное увеличение безотказности СУИ приводит к увеличению вероятности исправности КБО в целом при переходе от схемы В к схеме Г на один порядок (три девятки вместо двух) и практически неизменной отказоустойчивости КБО при остальных переходах. Последнее обстоятельство объясняется низкой исходной надежностью компонентов $k_{i,j}$ и небольшим числом непосредственного резервирования каждого из них (2 или 3 компонента в группе). Таким образом, надежность КБО ограничивается общей надежностью имеющегося набора компонентов.

Анализ табл. 7, иллюстрирующей надежность комплекса с большей избыточностью компонентов, показывает, что надежность КБО для схем А, Б1, Б2 и В осталась почти на том же уровне: уровень надежности их СУИ не позволил реализовать возможности увеличенного избытка компонентов. В схемах Г и Д надежность КБО существенно выросла (на 5 порядков). Алгоритмы парного арбитража (схема Д+) позволили существенно (на 7 порядков) увеличить надежность СУИ и поднять дополнительно еще на порядок общую надежность КБО, приблизив ее к максимально достижимому значению.

¹ Это утверждение справедливо даже с учетом отмеченного завышения оценки по формуле (12).

Таким образом, при равных исходных данных пример демонстрирует значительную эффективность предлагаемой схемы управления избыточностью с супервизорами конфигураций (схема Д+) в смысле повышения отказоустойчивости СУИ как за счет просто резервирования СК, так и за счет выполнения парного арбитража вычислителей и конфигураций. При достаточно большом уровне избыточности КБО (большой кратности резервирования компонентов и их конфигураций) это обеспечивает существенное увеличение отказоустойчивости комплекса в целом, позволяя реализовать закладываемый уровень надежности совокупности компонентов.

Заключение

Предложенный подход к управлению избыточностью технических систем, основанный на использовании супервизоров конфигураций, содержит парный арбитраж вычислителей (ПАВ) и конфигураций (ПАК). Такой арбитраж позволяет по формируемым матрицам предпочтения выбирать из числа располагаемых вычислителей и конфигураций такие, которые обладают гарантированной исправностью и при необходимости другими преимуществами перед альтернативами. Сравнительный анализ предложенной схемы на основе СК с другими известными подходами к управлению резервированием показал преимущества предлагаемого подхода при реализации системы управления избыточностью совокупности резервированных компонентов. Численные эксперименты подтверждают высокую эффективность обеспечения безотказности СУИ, в то время как отказоустойчивость КБО в целом существенно связана с располагаемой общей надежностью его компонентов. Использование высоконадежной СУИ предложенного типа позволит реализовывать требуемые уровни надежности бортовых комплексов с избыточным числом разнородных ресурсов. Предполагается ощутимый выигрыш подхода и с позиции эффективности функционального реконfigurирования.

Список литературы

1. Digital Avionics Handbook / ed. by C.R. Spitzer, U. Ferrell, T. Ferrell. 3-d ed. London ; N.Y. : CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015.
2. Клепиков В. И. Отказоустойчивость распределенных систем управления. М. : Золотое сечение, 2014.
3. Chandler P. R. Self-repairing flight control system reliability and maintainability program executive overview // Proc. of the IEEE National Aerospace and Electronics Conference. Dayton OH, 1984. P. 586–590.
4. Moerder D. D., Halyo N., Broussard J. R., Caglayan A. K. Application of precomputed control laws in a reconfigurable aircraft flight control system // Guidance, Control, and Dynamics. 1989. № 12. P. 325–333.
5. Montoya R. J. [et al.]. Restructurable Controls. Washington: NASA Scient. and Techn. Inf. Branch, 1983.
6. Blanke M., Staroswiecki M., Wu N. E. Concepts and methods in fault-tolerant control // Proc. American Control Conf., Arlington, USA, June 2001. P. 2606–2620.
7. Zhang Y., Jiang J. Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems // Proc. the 5th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes. Washington D.C., 2003. P. 265–276.
8. Каляев И. А., Мельник Э. В. Реконfigurируемые информационно-управляющие системы // Материалы пленар. заседания 5-й Рос. мультikonф. по проблемам управления. СПб. : Изд. ЦНИИ Электроприбор, 2012. С. 36–37.
9. Сельвесюк Н. И., Мельник Э. В., Платошин Г. А., Таранов А. Ю. Повышение надежности авиационных БИУС за счет реконfigurации // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 2. С. 204–212.
10. Дегтярев А. Р., Киселев С. К. Отказоустойчивые реконfigurирующиеся комплексы интегрированной модульной авионики // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2016. № 1, т. 12. С. 89–99.
11. Агеев А. М., Бронников А. М., Буков В. Н., Гамаюнов И. Ф. Супервизорный метод управления избыточностью технических систем // Известия РАН. Теория и системы управления. 2017. № 3. С. 59–69.
12. Буков В. Н., Бронников А. М., Агеев А. М. [и др.]. Концепция управляемой избыточности комплексов бортового оборудования // Науч. чтения по авиации, посвящ. памяти Н. Е. Жуковского : материалы XVI Всерос. науч.-практ. конф. (Москва, 11–12 апр. 2019) / гл. ред. С. П. Халютин. М. : ИД Акад. им. Н. Е. Жуковского, 2019. С. 17–33.
13. Беляев Ю. К., Богатырев В. А., Болотин В. В. [и др.]. Надежность технических систем : справочник / под ред. И. А. Ушакова. М. : Радио и связь, 1985.
14. Денисенко В. В. Аппаратное резервирование в промышленной автоматизации. Ч. 1 // Современные технологии автоматизации. 2008. № 2. С. 10–26.
15. Белоусов И. А. Формирование облика резервного контура интегрированной системы навигации и определения ориентации малого искусственного спутника Земли : дис. ... канд. техн. наук. М. : МАИ (ГТУ), 2003.
16. Юдицкий С., Подлазов В., Борисенко В. Узкие места в локальных сетях // LAN/Журнал сетевых решений. 1998. № 8. URL: <https://old.prolan.ru/company/article/magazine/lan091998.html>

17. Поляков В. Б., Неретин Е. С., Иванов А. С. [и др.]. Архитектура перспективных комплексов управления бортовым оборудованием // Труды МАИ. 2018. № 100. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=93459>
18. Говоров А. А., Селищев В. А., Говоров А. А. Супервизорные информационные системы управления технологическими объектами // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 7–2. С. 64–74.

References

1. Spitzer C.R., Ferrell U., Ferrell T. (eds.). *Digital Avionics Handbook*. 3-d ed. London; New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015.
2. Klepikov V.I. *Otkazoustoychivost' raspredelennykh sistem upravleniya = Fault tolerance of distributed control systems*. Moscow: Zolotoe sechenie, 2014. (In Russ.)
3. Chandler P.R. Self-repairing flight control system reliability and maintainability program executive overview. *Proc. of the IEEE National Aerospace and Electronics Conference*. Dayton OH, 1984:586–590.
4. Moerder D.D., Halyo N., Broussard J.R., Caglayan A.K. Application of precomputed control laws in a reconfigurable aircraft flight control system. *Guidance, Control, and Dynamics*. 1989;(12):325–333.
5. Montoya R.J. [et al.]. *Restructurable Controls*. Washington: NASA Scient. and Techn. Inf. Branch, 1983.
6. Blanke M., Staroswiecki M., Wu N.E. Concepts and methods in fault-tolerant control. *Proc. American Control Conf.*, Arlington, USA, June 2001:2606–2620.
7. Zhang Y., Jiang J. Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems. *Proc. the 5th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes*. Washington D.C., 2003:265–276.
8. Kalyaev I.A., Mel'nik E.V. Reconfigurable information and control systems. *Materialy plenar. zasedaniya 5-y Ros. mul'tikonf. po problemam upravleniya = Materials of the Plenar. Meetings of the 5th Russian Multi-conference on Management Problems*. Saint Petersburg: Izd. TsNII Elektropribor, 2012:36–37. (In Russ.)
9. Sel'vesyuk N.I., Mel'nik E.V., Platoshin G.A., Taranov A.Yu. Improving the reliability of aviation BIUS due to reconfiguration. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya Tula State University. Technical sciences*. 2021;(2):204–212. (In Russ.)
10. Degtyarev A.R., Kiselev S.K. Fault-tolerant reconfigurable complexes of integrated modular avionics. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy = Electrical and information complexes and systems*. 2016;12(1):89–99. (In Russ.)
11. Ageev A.M., Bronnikov A.M., Bukov V.N., Gamayunov I.F. Supervisory method of redundancy management of technical systems. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya = News of the Russian Academy of Sciences. Theory and control systems*. 2017;(3):59–69. (In Russ.)
12. Bukov V.N., Bronnikov A.M., Ageev A.M. [et al.]. The concept of controlled redundancy of onboard equipment complexes. *Nauch. chteniya po aviatsii, posvyashch. pamyati N. E. Zhukovskogo: materialy XVI Vseros. nauch.-prakt. konf. (Moskva, 11–12 apr. 2019) = Scientific readings on aviation, dedicated. in memory of N. E. Zhukovsky : materials XVI All-Russian Scientific and Practical Conference (Moscow, 11–12 Apr. 2019)*. Moscow: ID Akad. im. N. E. Zhukovskogo, 2019:17–33. (In Russ.)
13. Belyaev Yu.K., Bogatyrev V.A., Bolotin V.V. [et al.]. *Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem: spravochnik = Reliability of technical systems : handbook*. Moscow: Radio i svyaz', 1985. (In Russ.)
14. Denisenko V.V. Hardware redundancy in industrial automation. Part 1. *Sovremennyye tekhnologii avtomatizatsii = Modern technologies of automation*. 2008;(2):10–26. (In Russ.)
15. Belousov I.A. Formation of the appearance of the backup contour of the integrated navigation system and the determination of the orientation of a small artificial satellite of the Earth. PhD dissertation. Moscow: MAI (GTU), 2003. (In Russ.)
16. Yuditskiy S., Podlazov V., Borisenko V. Bottlenecks in local networks. *LAN/Zhurnal setevykh resheniy = LAN/Journal of network solutions*. 1998;(8). (In Russ.). Available at: <https://old.prolan.ru/company/article/magazine/lan091998.html>
17. Polyakov V.B., Neretin E.S., Ivanov A.S. [et al.]. Architecture of advanced avionics control systems. *Trudy MAI = Proceedings of MAI*. 2018;(100). (In Russ.). Available at: <http://trudymai.ru/published.php?ID=93459>
18. Govorov A.A., Selishchev V.A., Govorov A.A. Supervisory information management systems of technological objects. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya Tula State University. Technical sciences*. 2016;(7–2):64–74. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Андрей Михайлович Агеев

кандидат технических наук, доцент, докторант,
Военный учебно-научный центр
Военно-воздушных сил «Военно-воздушная
академия имени профессора Н. Е. Жуковского
и Ю. А. Гагарина
(Россия, г. Воронеж, ул. Старых большевиков, 54а)
E-mail: ageev_bbc@mail.ru

Andrey M. Ageev

Candidate of technical sciences,
associate professor, doctoral student,
Military Educational and Scientific Center
of the Air Force "Air Force Academy named after
Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin"
(54a Starykh bol'shevikov street, Voronezh, Russia)

Валентин Николаевич Буков

доктор технических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник,
Научно-исследовательский институт
авиационного оборудования
(Россия, Московская обл., г. Жуковский,
ул. Туполева, 18)
E-mail: v_bukov@mail.ru

Valentin N. Bukov

Doctor of technical sciences, professor,
leading researcher,
Research Institute of Aviation Equipment
(18 Tupoleva street, Zhukovsky,
Moscow region, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 27.09. 2021

Поступила после рецензирования/Revised 10.10.2021

Принята к публикации/Accepted 12.01.2022