

А. М. Агеев, канд. тех. наук, докторант, ageev_bbc@mail.ru,
ВУНЦ ВВС "Военно-воздушная академия", г. Воронеж,
В. Н. Буков, д-р техн. наук, вед. науч. сотр., v_bukov@mail.ru,
АО "НИИАО", г. Жуковский,
В. А. Шурман, главный специалист, vshurman@rpkb.ru,
АО "РПКБ", филиал в г. Жуковский

Алгоритмы управления избыточностью комплексов бортового оборудования подвижных объектов. Часть 1. Парный арбитраж конфигураций

Решается задача оперативного выбора наиболее подходящей в сложившихся условиях функционирования конфигурации компонентов избыточного комплекса бортового оборудования в интересах как обеспечения высокой отказоустойчивости комплекса, так и достижения одновременно с этим других его эксплуатационно-технических характеристик. Основу системы управления избыточностью составляют программные объекты по числу заблаговременно отработанных конкурентоспособных конфигураций разнородного и неуниверсального оборудования комплекса, называемые супервизорами конфигураций. Выбор же предпочтительной конфигурации предлагается осуществлять путем выполнения многоуровневого арбитража, включающего две фазы парного арбитража вычислителей комплекса и парный арбитраж супервизоров конфигураций. Средства обоих видов арбитража предлагается включать в каждый супервизор конфигурации, что обеспечивает его самодостаточность при участии в конкурсном отборе. Первая часть статьи посвящена парному арбитражу супервизоров конфигураций, реализующему взаимно-перекрестный анализ индексов готовности и показателей функциональной эффективности конфигураций, объединенных в пару. Организованный перебор таких пар позволяет выявить предпочтительную конфигурацию для последующей реализации. В целях обеспечения достоверности конкурса в условиях возможных коллизий, связанных с недостоверностью информационных посылок в паре или со сбоями модулей арбитража, введены процедуры, заключающиеся во взаимной перекрестной проверке информационных посылок между супервизорами пары. В случае возникновения конфликтов при выборе предпочтения предусмотрен взаимный обмен местами входов модулей арбитража и повторная оценка предпочтений. Предложены и проанализированы два варианта парного арбитража конфигураций различной сложности и эффективности с бинарными оценками предпочтения (упрощенный и полный), а также вариант арбитража с триплексными оценками предпочтения. Представлены результаты сравнения вариантов арбитража, выбираемых разработчиком исходя из соображений гарантированной достоверности или ограничений конструирования системы. Приводится методический пример, иллюстрирующий возможности парного арбитража конфигураций и его особенности практического характера.

Ключевые слова: супервизор конфигурации, парный арбитраж конфигураций, информационная посылка, матрица предпочтений, индекс готовности, показатель функциональной эффективности

Введение

Комплексы бортового оборудования (КБО) [1–7] образуются путем специальным образом организованного объединения различных по назначению, принципам функционирования и потребляемым ресурсам размещенных на борту аппаратных (системы, устройства, конструктивные элементы, каналы связи) и программных (операционные системы, функциональные приложения, файлы данных, драйверы устройств) компонентов. Обеспечение достаточно высокой надежности функционирования КБО, его отказоустойчивости и живучести в условиях неизбежной деградации компонентов возможно двумя путями: за счет повышения надежности компонентов, что ограничено технологическими факторами, либо за счет преднамеренного создания и использования избыточного набора в общем случае недостаточно надежных компонентов с организацией их изолирования или

замещения в случае неправильного функционирования [8, 9].

Всю совокупность операций, включающую мониторинг состояния компонентов избыточного комплекса и его функциональное реконфигурирование для парирования отказов и адаптации к условиям работы предложено называть *управлением избыточностью (УИ)* [10]. Известные технические решения [11–17], рассматриваемые в качестве возможного содержания такой совокупности, как правило, получены в условиях следующих существенных предположений о компонентах:

а) однородность — возможность подключения каждого из них на месте любого другого;

б) универсальность — применимость каждого из них для выполнения функций любого другого, что сужает перспективы их практического использования в реальных КБО.

Кроме того, обнаруживается специфичность каждого из этих решений, выражающая-

ся в возможности или эффективности его применения исключительно для определенных видов компонентов КБО.

В работе [18] сформулирован по замыслу лишенный указанных недостатков подход к УИ отказоустойчивых систем посредством так называемых *супервизоров конфигураций* (СК) — программных субъектов, каждый из которых соотнесен с определенной конфигурацией и выполняет все процедуры подготовки и реализации этой конфигурации.

В данной статье, состоящей из двух частей, излагаются методические и алгоритмические решения, направленные на осуществление многоуровневого арбитража конфигураций, составляющего основу системы управления избыточности (СУИ) КБО.

В первой части статьи представлены общие положения многоуровневого арбитража, а также предложены варианты алгоритма парного арбитража конфигураций (ПАК), предназначенного для оперативного выбора конфигурации, предпочтительной в сложившихся условиях (заданный режим КБО, техническое состояние и завершенность подготовки входящих в него компонентов, оценка ожидаемой эффективности применения комплекса). Предлагаемые подход и алгоритм нацелены на достижение предельно возможной децентрализации процедуры выбора конфигурации и, как следствие, на исключение "узких" в смысле надежности мест в перспективных отказоустойчивых системах с управляемой избыточностью.

Ключевые положения супервизорного подхода

Для разрабатываемого универсального подхода с использованием СК [18] в задаче выбора конфигураций КБО характерны следующие положения:

1. Избыточная система состоит из определенного множества аппаратных и программных компонентов, большая часть из которых имеет встроенные средства контроля (ВСК).

2. Компоненты избыточной системы могут быть неоднородными (ограничены возможности коммутации с другими компонентами) и неуниверсальными (применимы только для определенных функций). Ни один из компонентов в отдельности не является незаменимым или критическим с позиции отказоустойчивости системы в целом.

3. Отказам и систематическим сбоям подвержены все компоненты комплекса, включая их ВСК. Отказы компонентов носят простой характер, заключающийся в том, что на малом отрезке времени: а) возникновение отказов двух компонентов одинакового назначения является событием практически невероятным; б) отказы каждого из компонентов не связаны с отказами других.

4. Для выполнения системой функций по предназначению компоненты выборочно соединяются в работоспособную избыточную конфигурацию средствами коммуникации (для физических компонентов) и диспетчеризации (для программных компонентов).

5. В качестве универсальной характеристики готовности (способности к выполнению заданных функций) принимается бинарный показатель — индекс готовности (ИГ): 1 — готов, 0 — не готов. Для каждого отдельного компонента ИГ характеризует его работоспособность, загрузку и актуализацию необходимых программ и данных, для конфигурации в целом — готовность всех ее компонентов и целостность связей между ними.

6. В качестве универсальной характеристики относительной эффективности (результативности) каждого компонента и конфигурации в целом принимается показатель функциональной эффективности (ПФЭ), действительное скалярное значение которого задается или вычисляется установленным образом.

7. Каждой допустимой (потенциально возможной, предварительно отобранной) конфигурации ставится в соответствие специальный программный объект, названный СК, на который возлагаются функции [19]: а) хранения конфигурационных данных, а также ИГ и ПФЭ; б) инициализации процедур периодического мониторинга готовности компонентов и соотнесенной конфигурации в целом; в) инициализации процедур периодического мониторинга и коррекции (в зависимости от состояния, режимов работы КБО и команд экипажа) ПФЭ компонентов и соотнесенной конфигурации в целом; г) подготовки необходимых данных к участию в арбитраже конфигураций; д) участия периодически или по событию выявленного отказа в междиспетчерском арбитраже за право реализации соотнесенной конфигурации; е) запуск процедур реализации соотнесенной с ним конфигурации.

8. Одинаковые наборы супервизоров по числу возможных конфигураций размещаются в каждом выделенном под цели УИ вычислителе.

Этапы арбитража
Arbitration stages

Этап	Включенные процедуры	Место выполнения	Результат
Мониторинг	Мониторинг вычислителей Формирование группы готовых вычислителей	ДСК α -вычислителя предыдущего цикла	Группа готовых вычислителей
	Мониторинг компонентов КБО	ВСК компонентов	ИГ и ПФЭ компонентов
	Формирование ИГ и ПФЭ конфигураций	Все СК всех вычислителей	ИГ и ПФЭ конфигураций
1 этап: арбитраж вычислителей (1 фаза)	Определение "выделенной пары" вычислителей Предварительное определение и инициализация α -претендента в паре Передача управления α -претенденту	ДСК α -вычислителя предыдущего цикла	α -претендент, α -резерв
2 этап: арбитраж супервизоров конфигураций	Определение ДСК на основе ПАК Передача данных о ДСК в α -резерв	Все СК α -претендента	ДСК
	Запоминание данных ДСК	α -резерв	Копия ДСК
3 этап: арбитраж вычислителей (2 фаза)	Определение α -вычислителя на основе ПАВ Валидация ДСК Передача управления α -вычислителю	Выделенная пара вычислителей	α -вычислитель
Реализация конфигурации	Деактивация предыдущей конфигурации Активация конфигурации, соотнесенной с выбранным ДСК	Средства коммуникации и диспетчеризации	ДСК-конфигурация
Функционирование	Запуск и выполнение функций КБО	Вычислители ДСК-конфигурации	Функции КБО

9. Арбитраж между всеми конфигурациями выполняется исключительно средствами СК в так называемом α -вычислителе, получившем этот статус в предварительном арбитраже вычислителей¹.

Многоуровневый арбитраж конфигураций

Одной из ключевых особенностей подхода на основе СК является тот факт, что избыточные ресурсы КБО периодически или по факту обнаружения отказов проходят арбитраж в целях оперативного выявления наиболее подходящих из них в сложившихся условиях. Предлагаемая для этих целей процедура последовательного многоуровневого арбитража в общих чертах поясняется таблицей 1, где:

α -вычислитель — один из избыточного числа вычислителей КБО, выигравший арбитраж между вычислителями;

α -претендент — вычислитель, предварительно отобранный в качестве претендента к назначению α -вычислителем, в котором выполняются процедуры 2-го этапа арбитража;

¹ Вопросы организации арбитража вычислителей освещаются во второй части статьи.

α -резерв — второй готовый вычислитель выделенной пары, проигравший конкурс α -претенденту, получающий результаты работы α -вычислителя и готовый заменить последний в случае его отказа;

доминирующий супервизор конфигурации (ДСК) — СК, победивший в арбитраже супервизоров, которому делегируются полномочия по управлению коммутацией, инициализацией и другими операциями УИ;

ДСК-конфигурация — предпочтительная по итогам арбитража конфигурация, соотнесенная с ДСК.

Многоуровневому арбитражу предшествует этап мониторинга, на котором происходит подготовка необходимых данных о готовности и эффективности компонентов и конфигураций в целом. Выбор предпочтений осуществляется путем выполнения специальных процедур парного арбитража конфигураций (ПАК) и вычислителей (ПАВ). Итогом арбитража является однозначный выбор связки " α -вычислитель—ДСК", оптимальной (рациональной) в текущих условиях функционирования комплекса. По завершении цикла выполняется деактивация старой и активация новой ДСК-конфигурации, которая реализует

функционирование КБО по назначению. Одновременно происходит переход к следующему циклу работы СУИ.

Парный арбитраж конфигураций

Для выбора предпочтительной конфигурации предлагается следующая процедура ПАК.

Для обеспечения участия в арбитраже каждый СК содержит, во-первых, объекты арбитража (ОА), представленные данными обо всех предусмотренных компонентах конфигурации, и, во-вторых, субъекты арбитража в виде средств мониторинга ИГ и ПФЭ, а также модуля арбитража (МА). Все предусмотренные СК объединяются в пары, как показано на рис. 1. Между МА организуются информационные послышки (ИП), охватывающие взаимный обмен данными объектов арбитража (ИПОА). Формирование и обмен ИП поясняет рис. 2. На рис. 1, 2 ИД — идентификатор СК, ИПП — результаты предпочтений конфигураций.

Принципиально, чтобы у входов ИПОА1 и ИПОА2 было существенное различие (не допускается повторное использование одного и того же входа). Использование различных входов для одних и тех же данных должно отражаться на путях прохождения и результатах обработки данных¹.

Главная цель ПАК — добиться полного² отсутствия узких мест с тем, чтобы процедуры УИ сохраняли работоспособность вплоть до последней работоспособной конфигурации.

При парном сопоставлении ИГ конфигураций, выполняемом в анализаторах МА каждого СК пары, возможны следующие комбинации:

$$[ИГ1 \quad ИГ2] =$$
$$= \begin{cases} [1 \ 1] & \text{— а) готовы обе конфигурации;} \\ [1 \ 0] \\ [0 \ 1] \end{cases} \text{— б) готова одна конфигурация;} \quad (1)$$
$$[1 \ 0] \text{ — в) не готовы обе конфигурации.}$$

При выборе предпочтительной конфигурации со всей очевидностью:

¹ Пример: у модуля вычисления разности сигналов А и В создаются отдельно входы вхА и вхВ, перемена сигналов на входах модуля приводит к изменению знака результата на противоположный.

² В реальности этот теоретический идеал может оказаться не в полной мере достижим в силу разного рода ограничений.

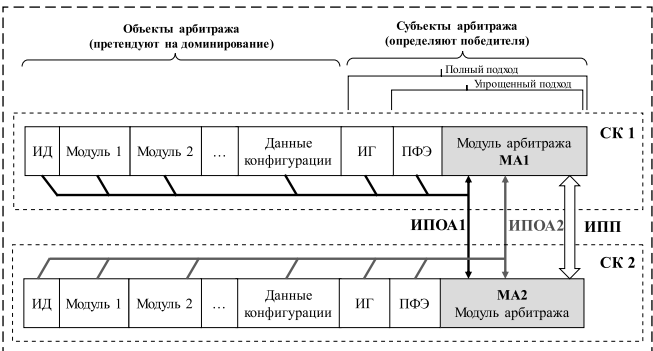


Рис. 1. Схема соединения пары супервизоров
Fig. 1. Connection diagram of a supervisor pair

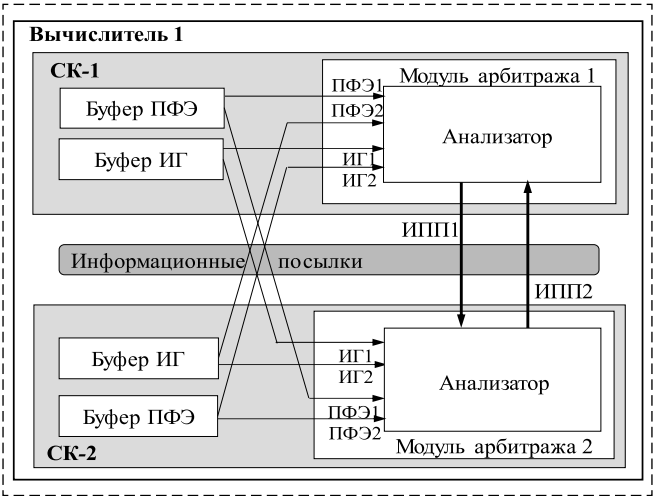


Рис. 2. Информационные послышки предпочтений при ПАК
Fig. 2. Information parcels of preferences at the PAC

- в случае а) требуется сопоставление их ПФЭ;
- в случае б) предпочтение однозначно отдается конфигурации с ИГ = 1;
- в случае в) ни одна из конфигураций не может претендовать на предпочтение, арбитраж объявляется несостоявшимся.

Далее предлагаются три варианта организации выбора предпочтения СК.

Упрощенный бинарный вариант ПАК

Упрощенный вариант предполагает реализацию анализа ИГ по формуле (1), сводящегося к вычислению конъюнкции ИГ всех компонентов конфигурации. Он выполняется каждым СК предварительно, соответствующая операция не подвергается перекрестному контролю в силу простоты и, как следствие, пренебрежимо малой вероятности ее неправильного исполнения, а процедура арбитража сосредотачивается только на сопоставлении ПФЭ конфигураций с ИГ = 1.

Считается обязательным выполнение следующих предположений:

а) неизменность ИГ и ПФЭ компонентов и конфигураций в процессе одного полного цикла арбитража;

б) ошибка МА может быть только¹ простой: "залипание" оценок предпочтения, когда результат не зависит от реальных характеристик сопоставляемых ОА и не изменяется за время одного полного цикла арбитража;

в) возможны одновременные ошибки двух МА в оговариваемых случаях.

При выполнении парного арбитража оба модуля МА1 и МА2 независимо сопоставляют конфигурации в паре, формируя индексы предпочтения:

"1" — для предпочтительной конфигурации;

"0" — для альтернативной (другой) конфигурации из пары.

С учетом принятого правила предпочтение должно быть однозначным, т. е. никакой работоспособный МА не может выдать два одинаковых индекса предпочтения обоим работоспособным конфигурациям пары (ни "1", ни "0").

Результат формируется в виде матрицы предпочтений (МП):

$$Q_{\text{ПАК}} = \begin{pmatrix} & \text{МА1} & \text{МА2} \\ \text{ОА1} & q_1^1 & q_1^2 \\ \text{ОА2} & q_2^1 & q_2^2 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где q_i^j — индекс предпочтения i -го ОА, определенный j -м МА.

Арбитраж выполняется в один или два (по необходимости) акта. В первом акте оба МА сопоставляют ОА, сравнивая все предусмотренные в ПФЭ характеристики².

Возможные исходы первого акта арбитража разделены на четыре группы:

а) подтвержденное предпочтение — окончательный результат:

$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ — среди работоспособных предпочтителен СК1,

$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$ — среди работоспособных предпочтителен СК2;

¹ Такое утверждение справедливо в силу "отсутствия памяти", когда анализ относится исключительно к текущему циклу арбитража без учета предыстории.

² Достижение отсутствия конфликтов неоднозначности результатов сравнения типа множества Парето обеспечивается проработкой структуры ПФЭ и является самостоятельной задачей.

б) неподтвержденное предпочтение — окончательный результат:

$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ — ошибка МА2, предпочтителен СК1,

$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ — ошибка МА1, предпочтителен СК2;

в) конфликт предпочтений — неокончательный результат:

$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ и $\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ — один из МА ошибается, создавая конфликт;

г) отсутствие предпочтений — окончательный результат:

$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ — ошибки обоих МА.

Отметим, что группа "г" существует, если допускается одновременное неправильное функционирование МА в обоих СК пары. Если же допустить обратное, то все исходы этой группы являются невозможными, а число групп сокращается до трех: "а" — "в". В случае наличия конфликта (исходы группы "в") в каждом СК взаимно меняются входы МА, и выполняется второй акт арбитража. При этом индексы предпочтения q_i^j , сформированные ошибающимся МА, сохраняют свои значения независимо от входных данных (см. "залипание" ранее), в то время как сформированные правильно функционирующим МА изменяют значения в соответствии с реальным соотношением конфигураций:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{cases} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} & \text{— имеет место ошибка МА2,} \\ & \text{предпочтение СК1,} \\ \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} & \text{— имеет место ошибка МА1,} \\ & \text{предпочтение СК2;} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{cases} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} & \text{— имеет место ошибка МА2,} \\ & \text{предпочтение СК1,} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} & \text{— имеет место ошибка МА1,} \\ & \text{предпочтение СК2.} \end{cases} \quad (4)$$

В компактном виде результаты обоих актов (при возможности одновременной неработоспособности МА в обоих СК) представлены в табл. 2, в которой (и далее) серым цветом отмечены варианты окончательного результата определения итогов арбитража.

Анализ значений МП при упрощенном бинарном варианте ПАК
Analysis of MP values in the simplified binary version of the PAC

1-й акт арбитража				Конфликты 1-го акта	2-й акт арбитража		
Предпочтительные конфигурации			Оценка ошибок МА		Предпочтительные конфигурации		Оценка ошибок МА
СК1	СК2	Нет предпочтения			СК1	СК2	
$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$	—	—	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$	—	МА2
$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$	—	МА2		—	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	МА1
$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	—	МА1	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	—	МА2
—	—	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	МА1, МА2		—	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$	МА1
Общее число значений МП — 16, 1 акт: СК1 — 3, СК2 — 3, нет предпочтений — 8, конфликт — 2, 2 акт: СК1 — 2, СК2 — 2 (по 1 в каждом из исходов)							

Алгоритм выбора предпочтения можно представить следующими наборами значений МП:

а) СК1, если $МП = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix};$

б) СК2, если $МП = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix};$

в) предпочтений нет в силу ошибок МА, если $МП = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}.$

При наличии ошибок ПАК как без последствий для его итога (предпочтительная конфигурация выбирается), так и с последствиями (не выбирается) в зависимости от политики разработчика могут приниматься различные решения: отбраковка конфигурации, либо ее повторное участие в арбитраже в составе другой пары. Несостоявшийся арбитраж при отсутствии готовности обеих конфигураций, как и возникновение ошибок МА, не является эквивалентом неисправностей (отказов) системы. Из отсутствия готовности конфигурации на этом цикле арбитража не вытекает отсутствие ее готовности в дальнейшем. Аналогично сла-

бый (уступающий по значению другим) ПФЭ не означает, что СК с таким ПФЭ совсем бесперспективен. При исчерпании других ресурсов "самый бесперспективный" СК может сыграть решающую роль в сохранении работоспособности системы в целом.

Полный бинарный вариант ПАК

При полном варианте предполагается, что в процедуру арбитража входит сопоставление как ИГ, так и ПФЭ двух конфигураций. В этом случае вероятности неправильного выполнения обоих анализов считаются значимыми.

Для полного бинарного варианта ПАК оговариваются следующие предположения:

а) каждым МА проверяются ИГ каждого СК и сравниваются их ПФЭ;

б) результатом арбитража является предпочтение конфигурации в паре и по возможности оценка ошибок МА;

в) одновременная ошибка обоих МА предполагается невозможной;

г) возможно отсутствие готовности любого или обоих СК одновременно, в первом случае предпочтение отдается готовой конфигурации, а во втором обе конфигурации признаются не работоспособными;

д) при отсутствии готовности одного из СК пары сравнение ПФЭ не выполняется;

Анализ значений МП при полном бинарном варианте ПАК
Analysis of MP values in the full binary PAC version

1-й акт арбитража				Конфликты 1-го акта	2-й акт арбитража		
Предпочтительные конфигурации			Оценка оши- бок МА		Предпочтительные конфигурации		Оценка оши- бок МА
СК1	СК2	Нет предпочтений			СК1	СК2	
$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$	—	Нет	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$	—	МА2 ₀
$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	~МА1 ₀		—	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	МА1 ₀
$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$		~МА2 ₀	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	—	МА2 ₀
$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	МА1 ₁		—	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$	МА1 ₀
$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	МА2 ₁	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$	Конфликт		
Общее число значений МП — 16, 1 акт: СК1 — 5, СК2 — 5, нет предпочтения — 3, конфликт — 3, 2 акт: СК1 — 2, СК2 — 2, конфликт — 1							

е) при возникновении конфликтной (противоречивой) ситуации арбитраж повторяется с предварительным обменом местами входов МА.

Подробный анализ возможных событий арбитража полного бинарного варианта показывает, что в нем по сравнению с упрощенным вариантом допускаются дополнительные случаи отдания предпочтения, связанные с независимым сопоставлением ИГ и ПФЭ.

Итоговый результат анализа значений МП при полном варианте ПАК представлен в табл. 3. Процедуры проверки результатов конфликтных ситуаций аналогичны соответствующим процедурам упрощенного варианта.

Триплексный вариант ПАК

Возможен альтернативный способ определения предпочтений в арбитраже, основанный на формировании каждым МА результатов арбитража в виде триплексной переменной по следующим правилам:

"0" — ни одна конфигурация не может быть использована, поскольку у обеих ИГ = 0;

"1" — конфигурация 1 является предпочтительной, конфигурация 2 либо имеет ИГ = 0, либо проигрышна по ПФЭ;

"2" — конфигурация 2 является предпочтительной, конфигурация 1 либо имеет ИГ = 0, либо проигрышна по ПФЭ.

После каждого акта сопоставления конфигураций формируется результат в виде матрицы предпочтений

$$Q^j = [q_1^j \quad q_2^j], \quad (5)$$

где q_i^j — индекс предпочтения i -й конфигурации, формируемый j -м МА.

Анализ ситуаций триплексного варианта проводился на основе соответствия полному бинарному варианту, результаты представлены в табл. 4.

После первого акта сопоставления конфигураций получаем одну из оценок: [0 0], [1 0], [2 0], [0 1], [0 2], [1 1], [1 2], [2 1] или [2 2]. Из них все значения с совпадающими индексами готовности: [0 0], [1 1], [2 2] однозначно определяют предпочтение одной конфигурации или отсутствие такового, поскольку по условию один из МА может быть отказавшим, но второй все равно указывает правильное значение.

Случаи различия индексов предпочтения в комбинациях [1 0], [2 0], [0 1], [0 2], [1 2] и [2 1] требуют повторного анализа путем перемены входов МА, исход которого определяется во 2-м акте арбитража.

Сравнение вариантов ПАК

Результаты сравнительного анализа предлагаемых подходов к ПАК, в том числе численный

Таблица 4
Table 4

Анализ значений МП при триплексном варианте ПАК
Analysis of MP values in the triplex version of the PAC

1-й акт арбитража			Кон- фликты 1-го акта	2-й акт арбитража			
Предпочтительные кон- фигурации				Предпочтительные конфигурации			Оценка ошибок МА
СК1	СК2	Нет пред- почтений		СК1	СК2	нет	
[1 1]	[2 2]	[0 0]	[0 1]	—	—	[1 0]	~ МА1 ₀ , МА2 ₁
				[1 1]	—	—	МА2 ₁
				—	—	[1 2]	МА2 ₁
			[0 2]	—	—	[2 0]	~ МА1 ₀ , МА2 ₂
				—	—	[2 1]	МА2 ₂
				—	[2 2]	—	МА2 ₂
			[1 0]	—	—	[0 1]	~ МА1 ₁ , МА2 ₀
				—	—	[0 0]	МА2 ₀
				—	—	[0 2]	МА2 ₀
			[1 2]	—	—	[2 1]	~ МА1 ₁ , МА2 ₂
				—	—	[2 0]	МА2 ₂
				—	[2 2]	—	МА2 ₂
			[2 0]	—	—	[0 2]	~ МА1 ₂ , МА2 ₀
				—	—	[0 0]	МА2 ₀
				—	—	[0 1]	МА2 ₀
			[2 1]	—	—	[0 2]	МА1 ₂
				—	—	[1 2]	~ МА1 ₂ , МА2 ₁
				[1 1]	—	—	МА2 ₁

Общее число значений МП — 9,
1 акт: СК1 — 1, СК2 — 1, нет предпочтений— 1, конфликт — 6,
2 акт: СК1 —2, СК2 — 2, нет предпочтений — 14,
Символом "~" отмечены возможные (неоднозначные) варианты.

Таблица 5
Table 5

Сравнение результативности вариантов ПАК
Comparison of the effectiveness of the PAC options

Результаты ПАК		Вариант ПАК		
		Бинарный		Три-плексный
		Упрощенный	Полный	
Общее число значений МП		18	18	14
1 акт	Предпочтителен СК1	3	5	1
	Предпочтителен СК2	3	5	1
	Бракуются обе конфигурации	8	3	1
	Конфликты 1 акта	2*	3*	6*
2 акт	Предпочтителен СК1	2	2	2
	Предпочтителен СК2	2	2	2
	Бракуются обе конфигурации	—	1	7
Итог**	Успешное предпочтение	10 (55,6 %)	14 (77,8 %)	6 (42,9 %)
	Бракуются обе конфигурации	8 (44,4 %)	4 (22,2 %)	8 (57,1 %)

* — учитываются во втором акте,
** — проценты составляют вес определенных исходов на фоне всех возможных значений МП, каждое из которых полагается равновесным.

анализ, представленный в табл. 5, позволяют сделать следующие выводы:

а) упрощенный вариант, основанный на ряде допущений, характеризуется относительной простотой реализации, но предполагает отдельную процедуру контроля готовности конфигураций;

б) включение анализа ИГ в процедуру полного варианта ПАК усложняет логику арбитража, но обеспечивает его цельность;

в) среди всех возможных исходов арбитража у полного бинарного варианта 3/4 конструктивных исходов (указывают предпочтение), у упрощенного бинарного варианта чуть больше 1/2 конструктивных исходов, а у триплексного варианта заметно меньше половины, что является его основным недостатком;

г) достоинствами триплексного варианта являются сокращение числа значений матрицы предпочтений, простота записи и глубина оценки ошибок МА.

Окончательный выбор варианта ПАК принимается разработчиком.

Алгоритм арбитража конфигураций

На рис. 3 представлена обобщенная схема алгоритма арбитража конфигураций, выполняемая независимо от варианта ПАК.

Множество всех СК после обновления их ИГ и ПФЭ по оговоренному дискриминационному правилу разбивается на пары. МА в каждом СК применительно к бинарным вариантам ПАК формирует свою пару¹ полуматриц предпочтения

¹ В триплексном варианте вместо пары элементов фигурирует триплексное значение.

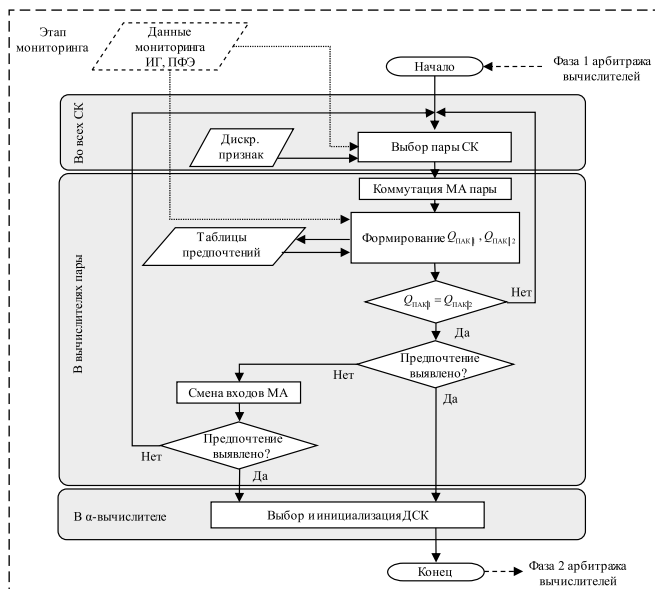


Рис. 3. Алгоритм арбитража конфигураций (одна итерация)
Fig. 3. Arbitration of configuration algorithm (one iteration)

$$Q_{ПАК|1} = \begin{bmatrix} q_1^1 & - \\ q_2^1 & - \end{bmatrix} \text{ или } Q_{ПАК|2} = \begin{bmatrix} - & q_1^2 \\ - & q_2^2 \end{bmatrix}.$$

Используя обмен данными через ИПП (см. рис. 2), каждый СК формирует идентичную МП пары

$$Q_{ПАК} = [Q_{ПАК|1} \quad Q_{ПАК|2}].$$

На основании правил предпочтений, сведенных в таблицы (с учетом выбранного варианта ПАК), определяется предпочтительный СК каждой пары, который участвует в ПАК более высокого уровня иерархии. Абсолютный победитель объявляется ДСК, и именно он определяет правила функционирования системы УИ вплоть до очередного результата арбитража конфигураций.

Методический пример

Демонстрация работы предложенных алгоритмов осуществляется на модели, включающей пять условных конфигураций КБО, каждая из которых содержит условный состав ОА (ИД, конфигурационные данные, ИГ, ПФЭ) и МА, реализующий ПАК в двух вариантах (полный бинарный и триплексный). В модели предусмотрена возможность изменения ИГ и ввод отказов МА типа залипания "0" или "1" в процессе работы КБО. В случае отказа в предпочтении любой СК может претендовать на предпочтение в последующих циклах арбитража.

Рис. 4 иллюстрирует следующие смоделированные типовые ситуации:

- 1) *штатная работа комплекса* — при наличии готовности всех конфигураций в арбитраж вступают СК1 и СК2, в результате победу одерживает СК1 (с меньшим порядковым номером);
- 2) *отказ компонентов конфигурации № 1* — имитируемый переводом ИГ из состояния "1" в состояние "0", алгоритм выбирает победителем СК2 с ИГ = 1, конфигурация № 1 может претендовать на предпочтение в последующих циклах;
- 3) *выбор наиболее эффективной конфигурации из пары* — обе конфигурации, соотнесенные с СК2 и СК3, имеют ИГ = 1, предпочтение отдается конфигурации СК3 (с большим интегральным ПФЭ);
- 4) *отказ модуля арбитража* — оценка МА "залипает" на значении "0", матрица предпочтений характеризуется как конфликтная, 2-й акт арбитража со взаимной заменой входов МА отдает предпочтение СК3;
- 5) *восстановленная работоспособность конфигурации* — имитируется восстановление готовности конфигурации № 1, СК1 выигрывает арбитраж в конкурсе с СК2 по аналогии с ситуацией 1.

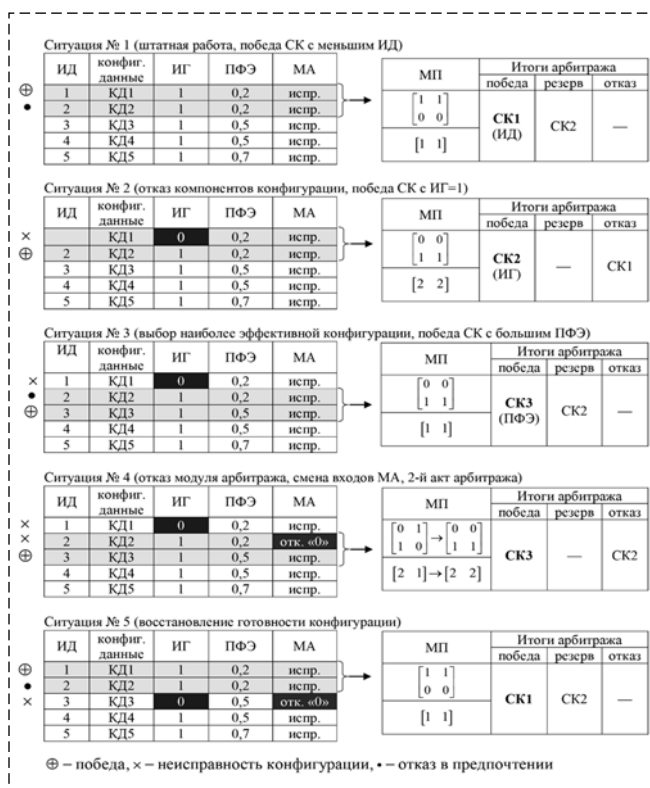


Рис. 4. Примеры исходов арбитража конфигураций
Fig. 4. Examples of arbitration of configuration outcomes

Пример демонстрирует работоспособность предложенных алгоритмов и соответствие их работы интуитивно ожидаемым результатам.

Заключение

В первой части статьи сформулирован универсальный подход к управлению избыточностью КБО в части выбора предпочтительной его конфигурации в сложившихся условиях на основе арбитража СК. Арбитраж реализуется путем объединения супервизоров в пары и выполнения ПАК, заключающегося в формировании и взаимной перекрестной оценке матриц предпочтений СК. Возможны упрощенный (перекрестной проверке подвергаются только ПФЭ) и полный (перекрестной проверке подвергаются ПФЭ и ИГ) варианты с бинарными индексами предпочтения, а также вариант с триплексными индексами предпочтения.

Предложенный подход должен составить основу системы управления избыточностью разнородных ресурсов перспективных КБО, а алгоритмы ПАК повысят ее устойчивость к возникновению конфликтных ситуаций арбитража СК, а также случайных ошибок модулей арбитража.

Список литературы

1. Алешин Б. С., Бабкин В. И., Гохберг Л. М. и др. Форсайт развития авиационной науки и технологий до 2030 года и на дальнейшую перспективу: Справочное пособие. М.: Изд. ФГУП ЦАГИ, 2014.
2. Федосов Е. А., Косьянчук В. В., Сельвесюк Н. И. Интегрированная модульная авионика // Радиоэлектронные технологии. 2015. № 1. С. 66–71.
3. Парамонов П. В., Жаринов И. О. Интегрированные бортовые вычислительные системы: обзор современного состояния и анализ перспектив развития в авиационном приборостроении // Науч.-техн. вестн. инф. технологий, механики и оптики. 2013. № 2 (84). С. 1–16.
4. Джанджгава Г. И. Перспективные унифицированные комплексы бортового оборудования // Радиоэлектронные технологии. 2022. № 1. С. 31–36.
5. Digital Avionics Handbook. 3-d ed. / Ed. by C. R. Spitzer, U. Ferrell, T. Ferrell. London, N. Y.: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015.
6. Butz H. The airbus approach to open integrated modular avionics (IMA): technology, methods, processes, and future road map // Workshop on Aircraft System Technologies. AST 2007. March 29–30. Hamburg, Germany.
7. Gatti M., Matet T. IMA2G Issues and challenges // MAKS Avionics Conference, August 27th, 2015 Moscow, Russia. URL: <http://www.modern-avionics.ru/Files/02-Thales-Gatti-27.08.2015.pdf> (дата обращения 13.09.2021).
8. Авакян А. А. Унифицированная интерфейсно-вычислительная платформа для систем интегральной модульной авионики // Тр. МАИ: Электронный журнал. № 65. 2013. С. 1–15. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35845> (дата обращения 13.09.2021).
9. Bukov V., Kutahov V., Bekkiev A. Avionics of Zero Maintenance Equipment // Proc. of 27th Congr. of the Int. Council of the Aeronautical Sciences, 19–24 Sept. 2010, Nice, France. ICAS. 2010. N. 2. Paper 7–1–1.
10. Буков В. Н., Бронников А. М., Агеев А. М., Гамаюнов И. Ф., Озеров Е. В., Шурман В. Н. Концепция управляемой избыточности комплексов бортового оборудования // Науч. чтения по авиации, посвящ. пам. Н. Е. Жуковского: Матер. XVI Всерос. науч.-практ. конф. (11–12 апр. 2019, Москва). М.: ИД Акад. Жуковского, 2019. С. 17–33.
11. Anderson T., Lee P. A. Fault Tolerance, Principles and Practices. London: Prentice Hall, 1981.
12. Ezhilarasu C. M., Zakwan Skaf Z., Jennions I. K. The Application of Reasoning to Aerospace Integrated Vehicle Health Management (IVHM): Challenges and Opportunities // Progress in Aerospace Sciences. 2019. N. 105. P. 60–73.
13. Watkins C. B. Integrated Modular Avionics: Managing the Allocation of Shared Intersystem Resources // IEEE/AIAA 25th Digital Avionics Systems Conference (DASC). Portland, Oregon, USA, 2006. P. 1–12.
14. Amato F., Cosentino C., Mattei M., Paviglianiti G. A Direct/functional Redundancy Scheme for Fault Detection and Isolation on an Aircraft // Aerospace Science and Technology. 2006. Vol. 10, N 4. P. 338–345.
15. Hainaut D. SCALable & Reconfigurable Electronics platforms and Tools — Towards the next generation of Integrated Modular Avionics. An Introduction to SCARLETT // Aerodays 2011 (30 Mar — 01 Apr 2011). Madrid, Spain, 2011. P. 135.
16. Каляев И. А., Мельник Э. В. Реконфигурируемые информационно-управляющие системы // Матер. пленар. засед. 5-й Росс. мультikonf. по пробл. управления. С-Пб.: Изд. ЦНИИ "Электроприбор", 2012. С. 36–37.
17. Дегтярев А. Р., Медведев Г. В. Алгоритм распределения задач в многопроцессорных комплексах интегрированной модульной авионики // Автоматизация процессов управления. 2014. № 1 (35). С. 79–84.
18. Агеев А. М., Бронников А. М., Буков В. Н., Гамаюнов И. Ф. Супервизорный метод управления избыточностью технических систем // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2017. № 3. С. 59–69.
19. Агеев А. М. Средства хранения и мониторинга конфигураций в задаче управления избыточностью комплекса бортового оборудования // Мехатроника, автоматизация, управление. 2022. Т 31, № 1. С. 45–55.

Algorithms for Managing the Redundancy of Onboard Equipment Complexes of Mobile Objects. Part 1. Paired Arbitration of Configurations

A. M. Ageev, ageev_bbc@mail.ru,

MESC AF "Air Force Academy", Voronezh, 394064, Russian Federation,

V. N. Bukov, v_bukov@mail.ru,

Research institute of aviation equipment, Zhukovsky, 140180, Russian Federation,

V. A. Shurman, vshurman@rpkb.ru,

Ramenskoye Instrument-Making Design Bureau, Ramenskoye, 140103, Russian Federation

Abstract

The article solves the task of an operational choice of the most suitable conditions for the functioning of the configuration of the components of a redundant onboard equipment in the interests at the same time as ensuring the high fault tolerance of the complex and the achievement of its other performance and technical characteristics. The basis of the redundancy management system is the program subjects in terms of the number of well-developed competitive configurations of heterogeneous and non-communicable equipment complex, called configuration supervisors. The choice of preferred configuration is proposed by performing a multi-level arbitration, which includes the comprising two phases of the pair arbitrator of the computers of the complex and the paired arbitration of configuration supervisors. To ensure the reliability of the competition in the conditions of possible collisions related to the unreliability of information parcels in a pair or with failures of arbitration modules, procedures have been introduced consisting in mutual cross-checking of information parcels between the supervisors of the pair. In case of conflicts when choosing a preference, mutual replacement of the inputs of the arbitration modules and re-evaluation of preferences is provided. The means of both types of arbitration are invited to include in each configuration supervisor, which ensures its self-sufficiency with participation in a competitive selection. The first part of the article is devoted to the paired arbitration of configuration supervisors that implements mutually cross-analysis of readiness indices and indicators of the functional efficiency of configurations combined into a pair. The brute force organized by any way allows you to identify the preferred configuration for subsequent implementation. Two options for paired arbitration of configurations of various complexity and efficiency with binary estimates of preferences (simplified and complete), as well as an arbitration option with triplex preference estimates are also proposed and analyzed. The results of the comparison of the arbitration options are presented, which is selected by the developer based on considerations of guaranteed presence or restrictions of the system design. A methodological example is given illustrating the possibilities of paired arbitration of configurations and its features of a practical nature.

Keywords: configuration supervisor, paired arbitration of configurations, information package, preference matrix, readiness index, functional efficiency indicator

For citation:

Ageev A. M., Bukov V. N., Shurman V. A. Algorithms for Managing the Redundancy of Onboard Equipment Complexes of Mobile Objects. Part 1. Paired Arbitration of Configurations, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 5, pp. 263—273 (in Russian).

DOI: 10.17587/mau.23.263-273

References

1. Aleshin B. S., Babkin V. I., Gohberg L. M. Foresight of Aviation Science and Technology Development until 2030 and Beyond: A Reference Guide, Moscow, Izd. FGUP CAGI, 2014 (in Russian).
2. Fedosov E. A., Kos'yanchuk V. V., Sel'vesyuk N. I. Integriruyemaya modul'naya avionika, *Radioelektronnye Tekhnologii*, 2015, no. 1, pp. 66—71 (in Russian).
3. Paramonov P. V., Zharinov I. O. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2013, no. 2 (84), pp. 1—17 (in Russian).
4. Dzhandzhgava G. I. Perspektivnye unifitsirovannye komplekсы bortovogo oborudovaniya, *Radioelektronnye tekhnologii*, 2022, no. 1, pp. 31—36 (in Russian).
5. Spitzer C. R., Ferrell U., Ferrell T. ed. Digital Avionics Handbook, London, N. Y., CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015.
6. Gaska T., Watkins C., Chen Y. Integrated Modular Avionics — Past, present, and future, *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2015, 30(9), pp.12—23.
7. Gatti M., Matet T. IMA2G Issues and challenges, *MAKS Avionics Conference*, August 27th, 2015 Moscow, Russia, available at: <http://www.modern-avionics.ru/Files/02-Thales-Gatti-27.08.2015.pdf> (accessed 13.09.2021).
8. Avakyan A. A. Tr. MAI: *Ehlektronnyi zhurnal*, 2013, no. 65, pp. 1—15, available at: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35845> (accessed 13.09.2021) (in Russian).
9. Bukov V., Kutahov V., Bekkiev A. Avionics of Zero Maintenance Equipment, *Proc. of 27th Congr. of the Int. Council of the Aeronautical Sciences*, 19—24 Sept. 2010, Nice, France, ICAS, 2010, no. 2, pp. 7—1—1.
10. Bukov V. N., Bronnikov A. M., Ageev A. M., Gamayunov I. F., Ozerov E. V., Shurman V. N. *Nauch. chteniya po aviatsii, posvyashch. pam. N. E. Zhukovskogo: Mater. XVI Vseros. nauch.-prakt. konf.* (11—12 apr. 2019, Moscow), Ed. by S. P. Khalyutin, Moscow, ID Akad. Zhukovskogo, 2019, pp. 17—33 (in Russian).
11. Anderson T., Lee P. A. Fault Tolerance, Principles and Practices, London, Prentice Hall, 1981.
12. Ezhilarasu C. M., Zakwan Skaf Z., Jennions I. K. The Application of Reasoning to Aerospace Integrated Vehicle Health Management (IVHM): Challenges and Opportunities, *Progress in Aerospace Sciences*, 2019, no. 105, pp. 60—73.
13. Watkins C. B. Integrated Modular Avionics: Managing the Allocation of Shared Intersystem Resources, *IEEE/AIAA 25th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, Portland, Oregon, USA, 2006, pp. 1—12.
14. Amato F., Cosentino C., Mattei M., Paviglianiti G. A Direct/functional Redundancy Scheme for Fault Detection and Isolation on an Aircraft, *Aerospace Science and Technology*, 2006, vol. 10, no. 4, pp. 338—345.
15. Hainaut D. SCALable & Reconfigurable Electronics platforms and Tools — Towards the next generation of Integrated Modular Avionics. An Introduction to SCARLETT, *Aerodays 2011* (30 Mar — 01 Apr 2011), Madrid, Spain, 2011, pp. 135.
16. Kalyaev I. A., Mel'nik E. V. *Mater. plenar. zased. 5-i Ross. mul'tikonf. po probl. Upravleniya*, S-Pb., Izd. TSNII "Ehlek-tropriboR", 2012, pp. 36—37 (in Russian).
17. Degtyarev A. N., Medvedev G. V. *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya*, 2014, no. 1 (35), pp. 79—84 (in Russian).
18. Ageev A. M., Gamayunov I. F., Bronnikov A. M., Bukov V. N. Supervisory control method for redundant technical systems, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2017, vol. 56, no. 3, pp. 410—419.
19. Ageev A. M. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2022, no. 1, vol. 31, pp. 45—55 (in Russian).