

# АЛГОРИТМЫ ПАРНОГО АРБИТРАЖА В ЗАДАЧЕ ВЫБОРА КОНФИГУРАЦИЙ ИЗБЫТОЧНОГО КОМПЛЕКСА ОБОРУДОВАНИЯ

**А.М. Агеев**

*Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия  
имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»*  
Россия, 394064, Москва, Старых Большевиков ул., 64 А  
E-mail: ageev\_bbc@mail.ru

**А.В. Евгенов**

*АО «Научно-исследовательский институт авиационного оборудования»*  
Россия, 140185, Жуковский, Московская обл., Туполева ул., 18  
E-mail: evgenoa@mail.ru

**В.А. Шурман**

*Филиал АО «Раменское приборостроительное конструкторское бюро»*  
Россия, 140185, Жуковский, Московская обл., Туполева ул., 18  
E-mail: shurmanva@mail.ru

**Ключевые слова:** управление избыточностью, супервизор конфигураций, арбитраж конфигураций, процедуры парного арбитража.

**Аннотация:** В докладе предложены технические и программные решения задачи оперативного непротиворечивого выбора подходящей в текущих условиях конфигурации компонентов избыточного комплекса оборудования. Решения основаны на арбитражном способе достоверного выбора предпочтительных устройств. Способ реализуется на основе алгоритма многоуровневого арбитража конфигураций, которым осуществляется выбор доминирующего супервизора конфигурации и реализующего его функции вычислителя. Для непосредственного формирования решения о предпочтении того или иного супервизора предложены процедуры парного арбитража, заключающиеся во взаимной перекрестной оценке готовности и эффективности конфигураций через представляющие их супервизоры. Приводятся результаты сравнительной оценки эффективности предложенных процедур с известным методом сравнения устройств компаратором, а также оценка их вклада в обобщенную надежность избыточных комплексов оборудования.

## 1. Введение

Избыточность компонентов комплексов оборудования (КО) позволяет эффективно решать проблемы отказоустойчивости, безопасности, быстродействия последних. В работах [1-3] сформулирован подход к управлению резервированием отказоустойчивых КО на основе использования *супервизоров конфигураций* (СК) – программных объектов, каждый из которых соотнесен с определенной конфигурацией оборудования и выполняет все процедуры управления подготовкой и реализацией этой конфигурации. Одной из особенностей такого подхода является то, что конфигурации, представляемые СК, периодически или по факту обнаружения отказов проходят

попарное сравнение с целью оперативного выявления наиболее подходящей из них (предпочтительной) в текущих условиях. Для обеспечения свойств непротиворечивости такого сравнения предлагается использовать *арбитраж конфигураций* [3], под которым понимаются процедуры однозначного непротиворечивого выбора предпочтительной конфигурации оборудования с разрешением возможных конфликтов такого выбора. Особенностью при этом является то, что сравнение конфигураций происходит через представляющие их СК. В докладе предлагается ряд технических и программных решений задачи арбитража конфигураций избыточного КБО, освещаются результаты сравнительных исследований характеристик такого арбитража.

## 2. Арбитражный способ достоверного выбора предпочтительных конфигураций

В основе предлагаемых решений лежит *арбитражный способ выбора предпочтительного объекта в группе устройств* (в данном случае в группе СК и, через СК, содержащих их вычислителей), отличающийся от известных способов сравнения технических устройств тем, что дополнительно введенными в каждый СК модулями арбитража (МА):

- объединяют устройства в пары по заданному правилу,
- используя результаты мониторинга готовности и функциональной эффективности устройств (в работах по СК применяются понятия индекса готовности (ИГ) и показателя функциональной эффективности (ПФЭ)), формируют в каждом устройстве независимые оценки предпочтения обоих устройств пары по этим и другим заданным критериям, определенным в рамках контролируемых показателей,
- осуществляют попарное сравнение (арбитраж) устройств путем сопоставления их оценок предпочтения до выявления однозначного победителя,
- победителя арбитража определяют как предпочтительное устройство (в работах по СК используются понятия доминирующего супервизора конфигурации (ДСК) и предпочтительного вычислителя ( $\alpha$ -вычислителя)),
- в случае невозможности определения победителя по причине равенства сравниваемых оценок назначают победителем одно из устройств пары по заданному дискриминационному правилу,
- в случае невозможности определения победителя по причине отрицательных оценок готовности, несовпадению оценок предпочтения, либо в случае других конфликтов арбитража признают оба устройства не предпочтительными;
- дополнительно выявляют возможные ошибки МА сравниваемой пары устройств.

## 3. Многоуровневый арбитраж конфигураций

Выбор предпочтительных конфигураций предлагается осуществлять путем выполнения многоуровневого арбитража конфигураций (МАК) [3], блок-схема которого представлена на рис. 1, включающего два этапа арбитража вычислителей и этап арбитража СК между ними.

*Первый этап* – межвычислительный арбитраж – предварительный выбор двух вычислителей. Выполняется во всех вычислителях и включает: определение ИГ каждого вычислителя; формирование группы вычислителей с положительным ИГ; выделение пары вычислителей среди готовых по принятому правилу; выбор претендента  $v_{\text{пер}}$  на статус -вычислителя в паре по принятому правилу, второй

вычислитель пары приобретает статус  $\alpha$ -резерва  $v_{рез}$ ; инициализацию вычислителя  $v_{прет}$  (передачу управления).

*Второй этап* – межсупервизорный арбитраж – выбор в  $v_{прет}$  предпочтительной конфигурации и передача информации о ней в  $v_{рез}$ . Выполняется вычислителями выделенной пары и включает: формирование ИГ компонентов каждой конфигурации; формирование ПФЭ каждой готовой конфигурации; последовательный попарный выбор предпочтительного СК вплоть до определения ДСК путем выполнения процедуры ПАК с учетом их ИГ и ПФЭ; инициализацию выбранного ДСК  $s_{opt}$ ; передачу из  $v_{прет}$  в  $v_{рез}$  информации о ДСК  $s_{opt}$ , где он принимает имя  $s_{opt.рез}$ .

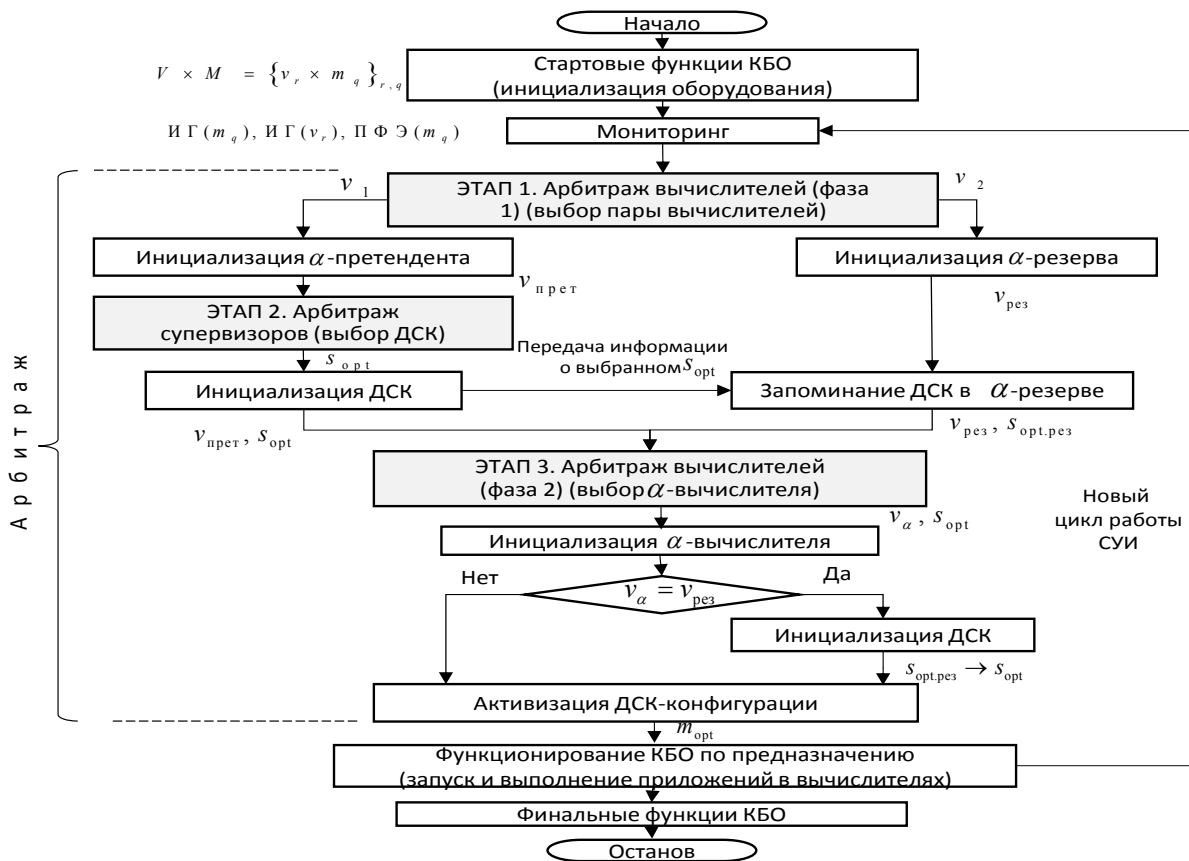


Рис. 1. Схема многоуровневого алгоритма арбитража конфигураций.

*Третий этап* – межвычислительный арбитраж – итоговый выбор вычислителей. Выполняется вычислителями пары и включает операции: окончательный выбор  $v_{\alpha}$  на основе процедуры ПАВ, включающей верификацию данных супервизора  $s_{opt}^{\alpha}$ , соотносимого с предпочтительной конфигурацией; в случае  $v_{прет} \rightarrow v_{\alpha}$  функции общего управления процессом выполняются в этом же вычислителе, а в случае  $v_{рез} \rightarrow v_{\alpha}$  они вместе со статусом  $\alpha$ -вычислителя передаются в резервный вычислитель; активизация выбранной конфигурации  $m_{opt}$  путем инициализации в  $\alpha$ -вычислителе  $v_{\alpha}$  соотнесенного с ней ДСК  $s_{opt}^{\alpha}$ .

## 4. Процедуры парного арбитража конфигураций

Суть процедур *парного арбитража*, вводимых в целях обеспечения достоверности арбитража в условиях возможных коллизий, связанных с ошибками обмена информацией в паре сравниваемых СК или со сбоями модулей арбитража, сводится к следующему [4, 5].

Множество всех СК по оговоренному правилу разбивается на пары. Супервизоры пары посредством МА объединяются, как показано на рис. 2а, между МА организуются информационные посылки (ИП) объектов арбитража (ОА), охватывающие взаимный обмен ИГ и ПФЭ, и формируемые на их основе информационные посылки предпочтений (ИПП). На этапе арбитража вычислителей, как показано на рис. 2б, в пары объединяются одноименные ДСК, расположенные в разных вычислителях, которые в свою очередь также сравнивают попарно данные конфигураций с эталонными конфигурационными таблицами.

Предложены варианты ПАК различной сложности с бинарными оценками предпочтения: *упрощенный* (ИГ сравниваются на предварительном этапе, а перекрестной проверке подвергаются только ПФЭ) и *полный* (перекрестной проверке подвергаются ПФЭ и ИГ), а также вариант с триплексными оценками предпочтения.

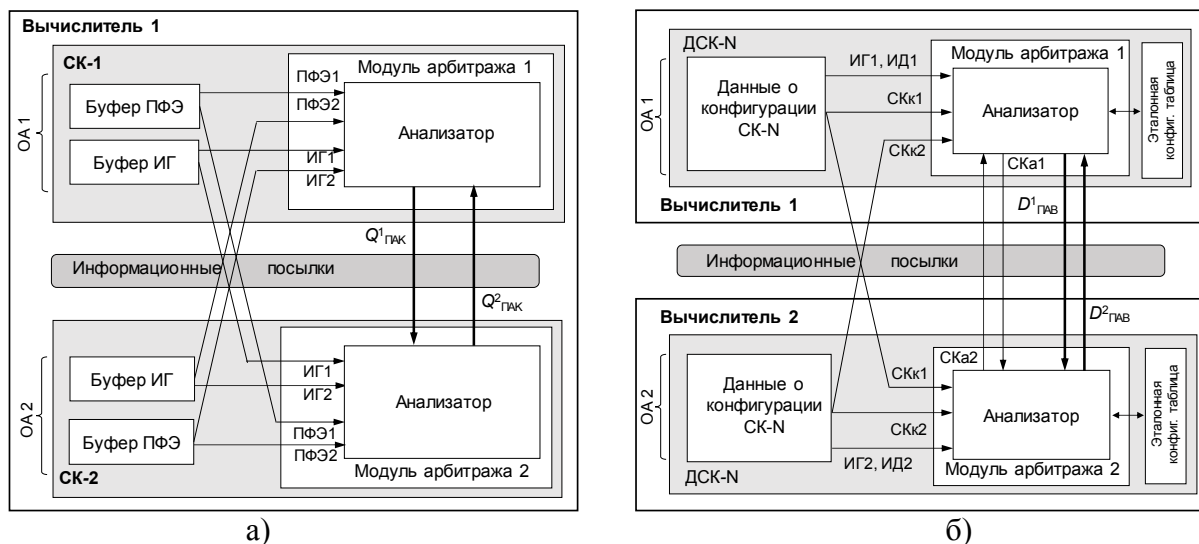


Рис. 2. Схема коммутации пары супервизоров конфигураций: а) при ПАК, б) при ПАВ.

При выполнении *бинарного варианта* ПАК модули арбитража обоих СК пары МА1 и МА2 независимо сопоставляют конфигурации, формируя *оценки предпочтения* (ОП):

«1» – для предпочтительной конфигурации,

«0» – для альтернативной (другой) конфигурации из пары.

Используя обмен данными через ИПП, каждый СК формирует идентичную МП пары  $Q^i_{ПАК} = \begin{bmatrix} q^1_1 & q^2_1 \\ q^1_2 & q^2_2 \end{bmatrix}$ , где  $q^j_i$  – оценка  $i$  –го ОА, определенная  $j$  –м МА.

На основании МП и правил предпочтений, сведенных в логические *таблицы предпочтений* (ТП), содержащие все множество исходов ПАК, определяется предпочтительный СК каждой пары, который затем участвует в ПАК более высокого уровня, на котором сравниваются СК-победители предыдущего этапа. Кроме того, ТП содержат информацию о диагностируемых ошибках МА того или иного СК с указанием ее типа: «ложный 0» или «ложная 1».

Результат ПАК обобщенно записывается формулой:

$$\widehat{s}^r_q = \mathfrak{R}_{ПАК}(Q_{ПАК.Б}), \widehat{s}^r_q \in \{СК1, СК2, non\},$$

где  $s_q^r$  – супервизор, соотнесенный с  $q$ -й конфигурацией в  $r$ -м вычислителе,  $\text{non}$  – ситуация невозможности отдания предпочтения ни одному из СК.

Похожим образом организуется процедура арбитража вычислителей (ПАВ). Анализаторы в модулях арбитража формируют ОП по совпадению (ОП=1) или несовпадению (ОП=0) конфигурации, сопоставленной ДСК, и эталонной для него конфигурации. В итоге в каждом вычислителе формируется матрица предпочтений вида  $D_{\text{ПАВ}}^i = \begin{bmatrix} d_1^1 & d_1^2 \\ d_2^1 & d_2^2 \end{bmatrix}$ , где  $d_i^j$  – оценка предпочтения  $i$ -го вычислителя, определенная анализатором СК $_{ai}$ , размещенным в  $j$ -м вычислителе.

Результат ПАВ формируется в виде:

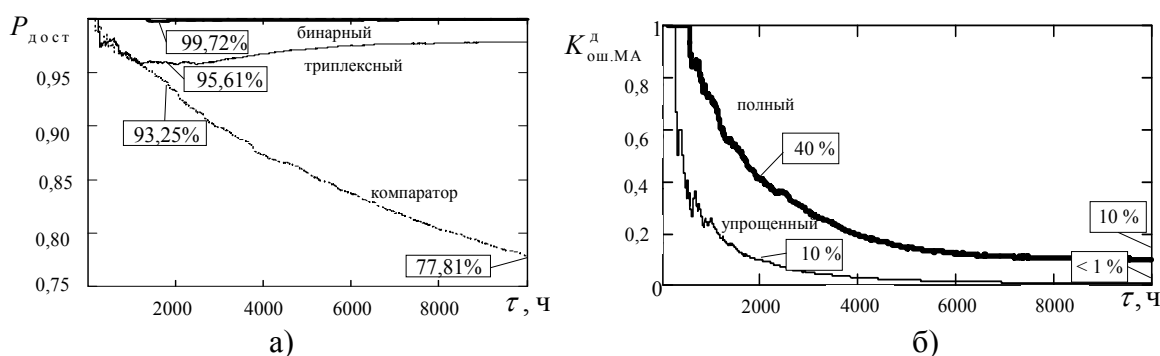
$$\widehat{v}_\alpha = \mathfrak{R}_{\text{ПАВ}}(D_{\text{ПАВ}}), \widehat{v}_\alpha \in \{v_{\text{прет}}, v_{\text{рез}}, \text{both}, \text{non}\},$$

где  $\text{both}$  – предпочтение может быть отдано любому из сравниваемых устройств,  $\text{non}$  – невозможность отдания предпочтения ни одному из них.

## 5. Исследование характеристик качества арбитража

Качество характеристик арбитража предложенных процедур оценивалось по показателям достоверности выбора предпочтения и полноты диагностирования модулей арбитража [6]. С помощью разработанной в этих целях стохастической модели проводилось статистическое моделирование гипотетической системы с условно бесконечным количеством устройств избыточного КБО, находящихся в горячем резерве, в условиях случайных отказов компонентов, отражаемых в готовности СК, а также ошибок МА последних. Принималось, что на одном такте моделирования в сравниваемой паре могут возникнуть по одному отказу любого СК в любом сочетании и только одна ошибка одного из МА.

На каждом шаге модели  $\tau$  определяются данные о числе отказов СК и ошибок МА, полученных алгоритмом арбитража оценки предпочтений СК (1, 2, none), диагностированных ошибках МА (ошибки типа «ложный 0», «ложная 1»). По этим данным оценивались вероятность правильного решения при арбитраже (достоверность арбитража), а также доля успешно диагностируемых ошибок МА (полнота диагностирования). Результаты численных исследований приведены на рис. 3.



**Рис. 3.** Результаты численного исследования алгоритмов арбитража: а) достоверность арбитража, б) полнота диагностирования ошибок МА.

В результате анализа были сделаны следующие выводы:

1) Предлагаемые процедуры парного арбитража с бинарными оценками предпочтения в среднем на 15–20 % эффективнее по сравнению с известным способом сравнения компаратором (достоверность выбора в 99,7 % относительно 77 %).

2) Бинарные процедуры успешно парируют критичные ошибки, возникающие при выборе предпочтения, полностью устраняя III рода и с вероятностью более 99 % ошибки I и II рода. Необнаруживаемая часть таких ошибок связана с неопределенностями конфликтных значений матриц предпочтений.

3) Упрощенный бинарный вариант ПАК, исключая анализ ошибок сравнения ИГ, более прост в реализации, обладает повышенной в среднем на 1-2 % достоверностью, значительно уступая при этом в полноте диагностики ошибок МА.

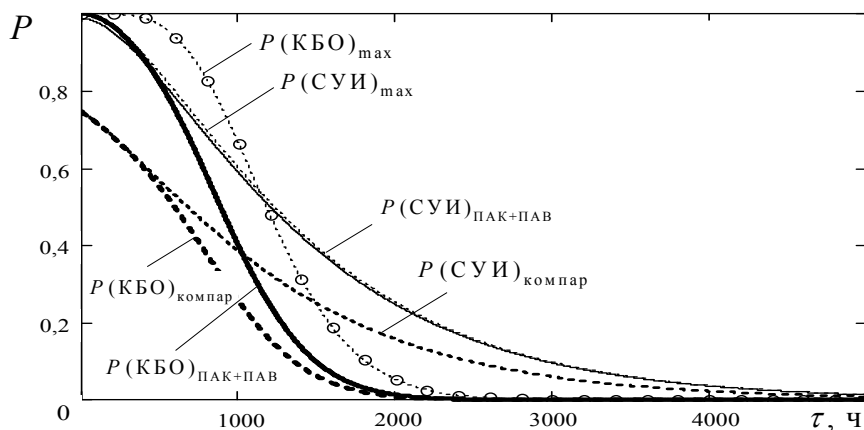
4) Полный бинарный вариант незначительно уступает упрощенному по величине достоверности, однако имеет достаточно высокий показатель полноты контроля ошибок МА (более 45 %), по совокупности преимуществ его реализация наиболее целесообразна.

5) Триплексный вариант арбитража обладает меньшей достоверностью контроля (порядка 95 %), допуская ошибки как I, так и II рода и не обладает возможностями по диагностированию ошибок МА. Его применение может быть целесообразно при разработке дополнительных схем самодиагностики с алгоритмами углубленного анализа состояний МА.

6) Различия процедур ПАК и ПАВ обусловлены в большей части решением об исходах конфликтного варианта МП  $\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$ . При ПАК – они влекут браковку обоих СК, при ПАВ – допускают возможность выбора одного из вычислителей. Это является следствием возникновения при ПАВ ошибок II рода с некоторым (до 99 %) снижением достоверности. В обоих случаях ошибки МА определяются приблизительно с одинаковой полнотой диагностирования, несмотря на меньшее число операций в ПАВ.

## 6. Вклад процедур арбитража в надежность КБО

Обобщенные оценки вклада процедур парного арбитража в надежность КБО на основе известных методов анализа схем надежности демонстрирует рис. 4 [1].



**Рис. 4.** Сравнительная оценка вероятности безотказной работы СУИ и КБО в целом с применением существующих и предлагаемых процедур выбора устройств.

Из графика видно, что предлагаемые решения позволяют обеспечить практически максимальную надежность СУИ, что в свою очередь обеспечивает повышение надежности КБО, приближая ее к максимально достижимой для располагаемого резерва составляющих его компонентов.

## 7. Заключение

Предложенные процедуры парного арбитража направлены на решение задачи непротиворечивого выбора предпочтительных конфигураций в избыточном комплексе оборудования. Оценка эффективности алгоритмов показывает выигрыш, состоящий в увеличении достоверности выбора предпочтений сравниваемых конфигураций, а также повышение полноты диагностики модулей арбитража супервизоров, осуществляющих такое сравнение. Разработанные алгоритмы могут быть положены в основу систем реконфигурации комплексов бортового оборудования различного целевого назначения (комплексы авионики, распределенные промышленные и транспортные системы и др.) для обеспечения их отказоустойчивости, безопасности и производительности.

## Список литературы

1. Буков В.Н., Агеев А.М., Евгенов А.В., Шурман В.А. Управление избыточностью технических систем. Супервизорный способ управления конфигурациями. М: Инфра-М, 2023. 333 с.
2. Агеев А.М., Буков В.Н., Бронников А.М., Гамаюнов И.Ф. Супервизорный метод управления технических систем с избыточностью // Известия РАН. Теория и системы управления. 2017. № 3. С. 72-82.
3. Агеев, А.М., Буков В.Н., Шурман В.А. Арбитражный подход к управлению избыточностью комплекса бортового оборудования на основе супервизоров конфигураций // Проблемы управления. 2022. № 2. С. 24-35.
4. Агеев, А.М., Буков В.Н., Шурман В.А. Алгоритмы управления избыточностью комплексов бортового оборудования подвижных объектов. Часть 1. Парный арбитраж конфигураций // Мехатроника, автоматизация, управление. 2022. Т. 23, № 5. С. 263-273.
5. Агеев, А.М., Буков В.Н., Шурман В.А. Алгоритмы управления избыточностью комплексов бортового оборудования подвижных объектов. Часть 2. Парный арбитраж вычислителей // Мехатроника, автоматизация, управление. 2022. Т. 23, № 6. С. 327–336.
6. Агеев, А.М., Буков В.Н. Эффективность парного арбитража в избыточных комплексах бортового оборудования // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 4. С 48-66.