

А. М. Агеев, канд. техн. наук, доц., ageev_bbc@mail.ru,
Военный учебно-научный центр Военно-воздушных Сил "Военно-воздушная академия
им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина", г. Воронеж

Принципы хранения и мониторинга информации о конфигурациях в задаче управления избыточностью комплекса бортового оборудования

Предложены принципы формирования основных структурных компонентов для реализации задачи управления избыточными ресурсами комплекса бортового оборудования (КБО): таблиц конфигураций, индексов готовности и показателей функциональной эффективности программных и аппаратных компонентов оборудования, позволяющие формализовать процессы их разработки и использования в задаче управления избыточными ресурсами КБО. Предложено разделение избыточных компонентов на группы ресурсов: вычислительные модули, компоненты ядра операционной системы, компоненты бортового программного обеспечения, компоненты периферийной коммутационной системы, аппаратные периферийные компоненты КБО. Сформулированы общие принципы организации мониторинга избыточных ресурсов, позволяющие использовать схемы и возможности как традиционных встроенных средств контроля (нижний уровень мониторинга), так и более развитых алгоритмических решений на основе логической обработки результатов контроля (средний и верхний уровни мониторинга). Предложены механизмы формирования, а также формы таблиц конфигураций для аппаратных компонентов и бортовых приложений, а также правила их заполнения, ориентированные на использование в супервизорах конфигураций. Разработаны и детализированы принципы формирования индексов готовности и показателей функциональной эффективности, позволяющие реализовать в программной среде учет различных факторов, определяющих возможности и эффективность различных вычислительных средств и конфигураций КБО. Предложен способ коррекции показателей функциональной эффективности конфигураций за счет формирования режимов, адаптирующего реконфигурирование комплекса к условиям его использования, решаемым задачам, командам оператора. Приведен пример учета разнообразия задач и режимов КБО воздушного судна: этапов полета, аварийных ситуаций, сервисных услуг и поддержки, режимов жизнеобеспечения, работы пилотажно-навигационного комплекса, а также управляющих команд экипажа. Предложенные решения могут быть использованы в системах автоматизированного проектирования комплексов оборудования, систем безопасности полетов, управления общесамолетным оборудованием, программно-управляемых систем радиосвязного оборудования, многоспектральных бортовых систем разведки, целеуказания и управления авиационным вооружением и специальными целевыми нагрузками перспективных авиационных комплексов.

Ключевые слова: комплекс бортового оборудования, управление избыточностью, мониторинг состояния, таблица конфигурации, индекс готовности, показатель функциональной эффективности

Введение

В настоящее время в области построения авионики осуществился переход от централизованных и федеративных к распределенным интегрированным комплексам бортового оборудования (КБО) [1–3]. В качестве примеров распределенных интегрированных КБО можно указать пассажирские самолеты Airbus A-380, SSJ-100, боевые самолеты F-35 и Су-57. Ведется разработка отечественных перспективных авиационных комплексов Ил-114 New, SSJ-75 и др. Тенденции современного развития бортового оборудования воздушных судов связаны с концепцией интегрированной модульной авионики (ИМА) [4–6]. В качестве кардинального пути снижения времени, упрощения технологии и снижения стоимости обслуживания воздушных судов (ВС), включая их бортовое радиоэлектронное оборудование (БРЭО), рассматривается реализация концепции авионики необслуживаемого бортового оборудования

(АНБО) [7, 8], которая созвучна с концепцией интегрированного управления исправностью транспортного средства (Integrated Vehicle Health Management — IVHM) [9, 10] и подразумевает бортовое оборудование, созданное с возможностью автоматического самовосстановления в заданный межрегламентный период функционирования без участия персонала.

Одним из принципов построения современных и перспективных КБО ВС является их избыточность (англ. redundancy) как на системных уровнях сетевых связей, каналов передачи данных, вычислительных систем, так и на уровне отдельных модулей, узлов, компонентов [11]. Под избыточностью технической системы понимается наличие в ней возможностей (аппаратных, вычислительных, энергетических и т. д.) сверх тех, которые могли бы обеспечить ее нормальное функционирование [12]. В АНБО избыточность является непрямым свойством для реализации возможности автоматического восстановления (различными техническими средствами)

отказавших функций комплекса. Кроме того, за счет так называемой функциональной избыточности возможно достижение других, принципиально новых качеств комплекса (многофункциональности, адаптации к внешним условиям, решаемой задаче и др.).

Постановка задачи

В работах [13—17] последовательно развиваются теоретические аспекты *теории управления избыточностью* комплексов оборудования на основе супервизорного подхода. В статье [13] вводится понятие *супервизора конфигурации*, под которым понимается аппаратный или программный модуль, на который возлагается формирование, хранение, обновление и при необходимости использование информации о каждой конкурентоспособной конфигурации КБО. В работах [14—16] обосновываются основные теоретические положения формализации задач формирования конфигураций и конфигурирования избыточных ресурсов. Статья [17] посвящена практической адаптации подхода к решению задач управления вычислительной системой КБО.

В указанных работах сформирована систематизированная совокупность понятий, методик и структур бортовой системы управления избыточностью, которые оформились в *супервизорный способ управления избыточностью* как

способ обработки данных об альтернативных конфигурациях, включающий сбор данных, подготовку и проведение арбитража претендентов на предпочтение с последующей реализацией выбранного победителя (вычислителя или конфигурации). Обоснована структура и сформулированы основные положения о *системе управления избыточностью* (СУИ) КБО, упрощенная структурная схема которой представлена на рис. 1.

Предложенная система предполагает наличие множеств резервированных избыточных компонентов КБО со встроенными средствами контроля (ВСК), вычислителей и коммутационных средств и опирается на множество супервизоров конфигураций (СК), каждый из которых включает: таблицы конфигураций, таблицы показателей функциональной эффективности, буфер индексов готовности, модуль мониторинга, формирователь режимов, алгоритмы арбитража супервизоров, управляющий модуль, а также вспомогательные процедуры и буферные файлы. На рис. 1 ДСК — доминирующий СК — победитель арбитража, α -вычислитель — вычислитель, в котором реализуется ДСК.

В число важных функций супервизоров входят мониторинг состояния программных и аппаратных компонентов, а также хранение данных о конфигурациях. Настоящая статья направлена на обоснование основных принципов формирования и технической реализации в КБО конфигурационных таблиц, индексов готовности и

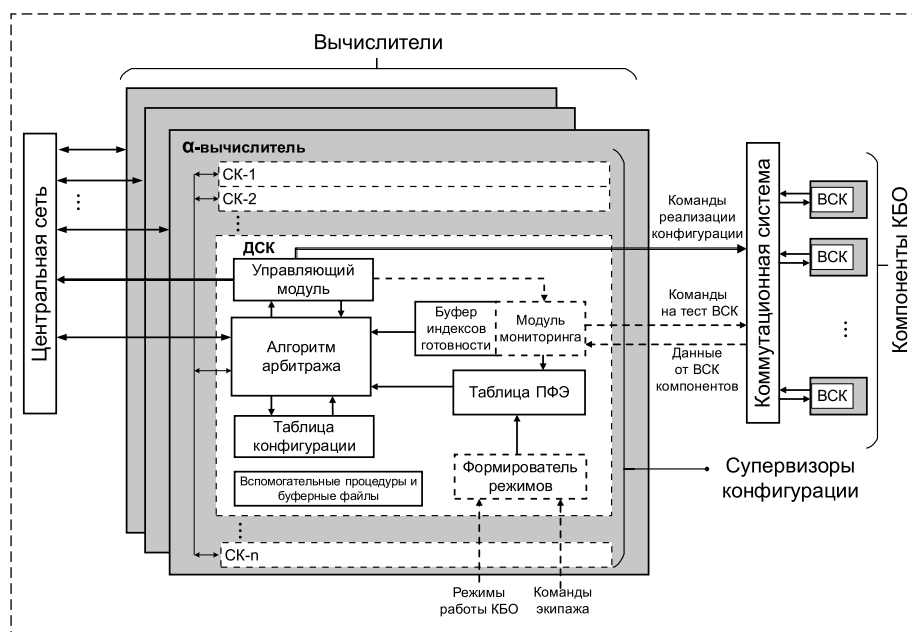


Рис. 1. Система управления избыточностью КБО

Fig. 1. OEC redundancy management system

показателей функциональной эффективности компонентов оборудования, позволяющих формализовать процессы их разработки и использования в задаче управления разнородными ресурсами в рамках супервизорного способа управления избыточностью КБО.

Избыточные ресурсы КБО

Предполагается, что комплекс состоит из набора компонентов, различных по предназначению, физической природе и принципам функционирования, избыточного в том смысле, что никакой из компонентов не обладает исключительностью

или незаменимостью в составе комплекса, при этом предусматривается превышающая единицу кратность резервирования компонентов, выполняющих одинаковые или взаимозаменяемые (полностью или частично, возможно с частичной потерей эффективности) функции.

Под *конфигурацией* избыточной системы (комплекса) понимается специальная, временно сформированная не избыточная работоспособная совокупность компонентов, соответствующая решаемым задачам на текущем этапе полета.

Все ресурсы КБО, участвующие в процессе управления избыточностью — *избыточные ресурсы* — делятся на несколько групп, число которых определяется разработчиком КБО в зависимости от задач управления, а также оценки возможности и целесообразности управления их реконфигурацией.

В задачах управления ресурсами КБО авиационных комплексов в простейшем случае могут выделяться следующие группы: вычислительные модули (ВМ), компоненты бортового функционального программного обеспечения (ФПО), компоненты периферийной коммутационной системы (ПКС), аппаратные периферийные компоненты КБО (КОМ)¹.

Формирование и хранение конфигурационных данных

Согласно работе [1] *таблицы конфигурации* — это специально организованные струк-

б) связей между компонентами программных ресурсов (наличие или отсутствие передачи целевой информации между приложениями);

в) распределения функциональных приложений между вычислителями, которое в общем случае можно также рассматривать как связь между компонентами: аппаратными (вычислителями) и программными (запускаемыми в них приложениями).

В целях определения правил формирования конфигурационных таблиц приведем формализованное описание элементов хранения данных о конфигурациях, основные понятия о которых приведены в работах [13—17].

Будем полагать, что КБО содержит множество $\mathfrak{R}$ компонентов, общее число входов и выходов которых составляют множества $\mathfrak{R}_{\text{вх}}$ и $\mathfrak{R}_{\text{вых}}$ соответственно. Пусть общее число различных рассматриваемых конфигураций КБО составляет n . Каждая из конфигураций содержит подмножество соотнесенных с ней компонентов $\mathbf{K} \in \mathfrak{R}$, общее число которых обозначим k , а общее число их входов и выходов $k_{\text{вх}} \in \mathfrak{R}_{\text{вх}}$ и $k_{\text{вых}} \in \mathfrak{R}_{\text{вых}}$ соответственно.

Тогда в общем случае будут иметь место n конфигурационных таблиц (по числу конфигураций), каждая i -я из которых в своем "ядре", т. е. без учета дополнительных строк и столбцов, будет содержать k столбцов и 2 строки: ячейки верхней строки таблицы содержат номера компонентов η , с которыми связаны входы данного компонента, а нижней — номера компонентов ρ , с которыми связаны выходы данного компонента:

$$\mathbf{K}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{\text{вх}} \\ \mathbf{K}_{\text{вых}} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|c|c|c} \text{комп. 1} & \text{комп. 2} & \dots & \text{комп. } k \\ \hline [\eta_{11} \ \eta_{12} \ \dots \ \eta_{1n}] & [\eta_{21} \ \eta_{22} \ \dots \ \eta_{2m}] & \dots & [\eta_{N1} \ \eta_{N2} \ \dots \ \eta_{Nq}] \\ \hline [\rho_{11} \ \rho_{12} \ \dots \ \rho_{1k}] & [\rho_{11} \ \rho_{12} \ \dots \ \rho_{1l}] & \dots & [\rho_{N1} \ \rho_{N2} \ \dots \ \rho_{Np}] \end{array} \right]$$

– номера входов

– номера выходов.

туры данных, которые формируются на этапе разработки и хранят информацию о соотнесенной с супервизором конфигурации в виде:

а) связей между компонентами аппаратных ресурсов (наличие или отсутствие соединения их входов и выходов);

При этом клетки таблицы, соответствующие отсутствию связей между компонентами, заполняются нулями. Например, запись

$$\mathbf{K}_7 = \left[\begin{array}{c|c|c|c|c} 2, 3, 5 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \hline 3 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{array} \right] \tag{2}$$

1
2
3
4
5
— номера компонентов

означает, что конфигурация № 7 содержит 5 компонентов, вход компонента № 1 соединен с выходами компонентов № № 2, 3 и 5, причем компоненты № 1 и № 3 имеют двунаправленную связь.

¹Далее принятые аббревиатуры будем использовать для обозначения в таблицах, относящихся к той или иной группе ресурсов.

Как описано в работе [15], таблицы конфигураций могут храниться в форме матриц связей вида (для приведенного выше примера): раздельно для кодирования связей по входам

$$C_{7_{\text{вх}}} = \begin{matrix} K_{\text{вх}} [2, 3, 5 | 0 | 1 | 0 | 0] \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1^{\wedge} & 0 & 0 \\ 1^{\wedge} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1^{\wedge} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1^{\wedge} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (3)$$

и по выходам

$$C_{7_{\text{вых}}} = \begin{matrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1^{\vee} & 0 & 0 \\ 1^{\vee} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1^{\vee} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1^{\vee} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ K_{\text{вых}} \begin{bmatrix} 3 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (4)$$

или в обобщенном виде

$$C_7^* = \begin{matrix} K_{\text{вх}} [2, 3, 5 | 0 | 1 | 0 | 0] \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1^* & 0 & 0 \\ 1^* & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1^* & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1^* & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ K_{\text{вых}} \begin{bmatrix} 3 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \end{matrix}, \quad (5)$$

где знаками $1^{\wedge}$ отмечены связи по входам; $1^{\vee}$ — связи по выходам; 1^* — двунаправленные связи между компонентами. Единицы в матрицах связей указывают на наличие связей, нули — на их отсутствие. Число единиц в одном столбце или строке, таким образом, соответствует числу активных (задействованных для коммутации) входов или выходов компонентов. Диагональ матрицы остается незадействованной, либо может использоваться для хранения дополнительной информации о компонентах (готовности и т. д.).

Для перехода от записи таблицы (1) к (3) и (4) требуется "разнести" векторы индексов верхней и нижней строк матрицы K по соответствующим строкам и столбцам матриц связей $C_{\text{вх}}$, $C_{\text{вых}}$.

Для осуществления обратного перехода необходимо:

- номера строк всех единичных ($1^{\wedge}$) элементов матрицы $C_{\text{вх}}$ снести в одну дополнительную строку;

Таблица конфигурации (коммутация компонентов)
Configuration table (component commutation)

Взаимосвязи компонентов	№ компонентов					
	1	2	3	4	5	...
На входе	2, 3, 5 [∨]		1			
На выходе	3	1	1		1	

- номера строк всех единичных ($1^{\vee}$) элементов матрицы $C_{\text{вых}}$ снести в один дополнительный столбец;
 - номера строк и столбцов всех единичных (1^*) элементов матрицы C^* добавить одновременно в указанные дополнительные строку и столбец.
- Таким образом, конструкции (3), (4) и (5) обеспечивают однозначную связь с интерфейсными и конфигурационными матрицами из работ [14–16] по формализации задачи управления избыточностью и генерированию альтернативных конфигураций комплекса оборудования.

На практике ячейки таблиц конфигураций предлагается формировать следующим образом. Информация о каждой конфигурации КБО хранится в форме электронных таблиц вида, представленного в табл. 1. Каждая строка разбита на две подстроки. Для каждого компонента k_j в верхней подстроке указываются порядковые номера компонентов, соединенных своими выходами с входом k_j (от каких компонентов идет информация на k_j), в нижней подстроке — номера компонентов, соединенных своими входами с выходом k_j (каким компонентам идет информация с k_j). Если вход или выход компонента не используется, ставится "0". Наполнение табл. 1 соответствует примеру, приведенному в выражении (2), стрелками показаны направления соответствующих связей.

Аналогичным образом формируются таблицы конфигураций программных компонентов: таблица формируется путем указания номеров приложений f_{ij} в ячейках для входов содержащих их вычислителей, а также указания номеров вычислителей v_{ij} в ячейках для входов ФПО:

$$K_i = \begin{matrix} \text{ВМ. 1} & \text{ВМ. 2} & \dots & \text{ФПО.1} & \text{ФПО.2} & \dots \\ \begin{bmatrix} f_{11} & f_{1n} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} f_{21} & f_{2n} \end{bmatrix} & \dots & \begin{bmatrix} v_{11} & v_{1m} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} v_{21} & v_{2m} \end{bmatrix} & \dots \\ \underbrace{\hspace{10em}}_{\text{вычислители}} & \underbrace{\hspace{10em}}_{\text{приложения}} \end{matrix}$$

Таблица конфигурации (распределение приложений)
Configuration table (application distribution)

	Вычислители					Приложения			
№ компонентов	1	2	3	4	5	6	7	8	...
Обозначения	ВМ-1	ВМ-2	ВМ-3	ВМ-4	ВМ-5	ФПО-1	ФПО-2	ФПО-3	...
Взаимосвязи						2	3		...
		6	7						...

Таблица 3
Table 3

Обобщенная конфигурационная таблица КБО
Summary OEC configuration table

	Вычислители					Приложения					Компоненты				
№ компонентов	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Обозначение	ВМ-1	ВМ-2	ВМ-3	ВМ-4	...	ФПО-1	ФПО-2	ФПО-3	ФПО-4	...	К-1	К-2	К-3	К-4	...
Взаимосвязи	11			13	...	2	1, 3		4	...		4			...
	7	6	7	12	...					...	1		4		...

В примере (в табл. 2) показано, что в конфигурации № 1 во втором вычислителе задействованы (инициализированы и выполняют свою штатную функцию) ФПО-1, а в третьем вычислителе — ФПО-2.

Формирование таблиц ведется поэтапно, от низшего уровня к высшему. На первом этапе заполняются ячейки, соответствующие компонентам в составе подсистем, далее заполняются связи внутри систем и групп компонентов, после этого — связи между всеми компонентами, входящими в КБО, до получения единой многосвязной таблицы конфигураций КБО (табл. 3).

Процесс разработки конфигурационных таблиц может быть автоматизирован с использованием методов и соответствующих систем автоматизированного проектирования и интеграции КБО.

Организация мониторинга ресурсов

Цель мониторинга избыточных ресурсов КБО — формирование индекса готовности (ИГ) каждого компонента комплекса для обеспечения всех СК первичными данными в интересах управления избыточностью. Перечень данных, охватываемых мониторингом,

в зависимости от физической природы и конструктивных особенностей компонентов может включать бинарные оценки (1 — соответствие требованиям, 0 — в противном случае):

- работоспособности (подтвержденное ранее надлежащее выполнение основной функции, отсутствие или приемлемая частота сбоев);
- удовлетворительных результатов самодиагностики (при наличии);
- наличия и правильной работы необходимого обеспечения (электропитание, охлаждение, ресурсы памяти и процессорное время и т. п.);
- доступности для коммуникации (наличие электрической связи, готовность к работе буферов и пр.);
- завершения установки и запуска программ (при наличии);
- завершения загрузки и распаковки необходимых для работы массивов библиотечных данных (при наличии) и др.

Мониторинг выполняется в три основных шага:

- а) сбор данных от компонентов путем инициализации данных специальными запросами, либо в режиме перехвата трансляции, организованной компонентами самостоятельно;

б) обработка данных, включая логическое объединение, а также подготовку результата к передаче;

в) передачу результата в виде ИГ по запросам СК или путем транслирования в сеть.

Мониторинг избыточных ресурсов предполагается трехуровневым¹.

Нижний уровень базируется исключительно на существующих или вновь создаваемых ВСК компонентов [18], не выходя за их рамки. В зависимости от реализации может выполняться в процессе функционирования компонента и/или в режиме его "дежурства".

Средний уровень базируется на тех же ВСК, но с реализацией процедур логического парного мониторинга (ЛПМ) [19] резервированных компонентов, что при неоднородности² ВСК позволяет создать эффект достоверного контроля работы функциональной части компонентов и достоверного контроля работы самих ВСК.

Верхний уровень не зависит от ВСК и базируется на использовании технологии направленных триплексных графов (НТГ) [20], что обеспечивает качественно новый уровень контроля безотказности функционирования КБО.

Процедуры мониторинга выполняются *модулем мониторинга*, входящим в состав каждого СК. Возможны варианты реализации КБО с вынесением отдельных функций мониторинга за пределы СК в виде отдельных модулей мониторинга, что особенно актуально для сложных и требовательных к вычислительным затратам алгоритмов среднего и высокого уровней мониторинга.

Принципы формирования индексов готовности

Независимо от выбранного способа мониторинга избыточных ресурсов результат их работы представляется в виде, необходимом для формирования по следующим правилам.

¹Алгоритмы реализации каждого из уровней мониторинга в данной статье не рассматриваются.

²ВСК одинакового предназначения созданы различными разработчиками и/или на основе различных технических решений.

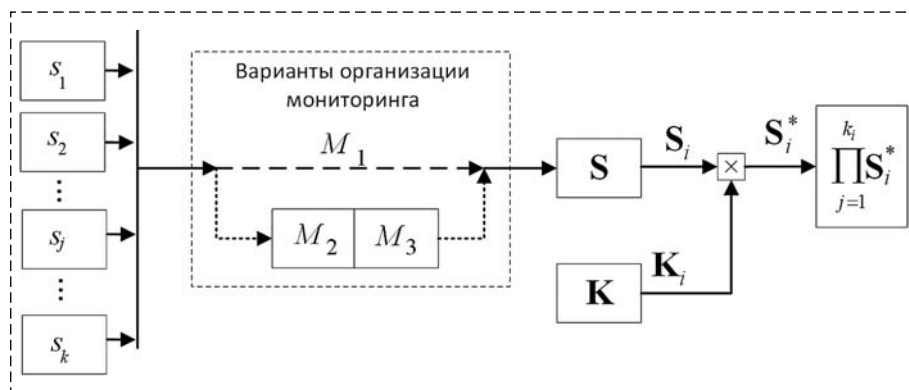


Рис. 2. Схема формирования интегрального индекса готовности конфигурации
Fig. 2. Configuration Integral Available Index formation scheme

Индекс готовности характеризует работоспособность компонента КБО и может принимать значения: "1", если компонент исправен и готов к использованию на следующем цикле работы системы; "0", если компонент не исправен и/или не готов.

Пусть в КБО предусмотрены n конфигураций. Компоненты конкретной i -й конфигурации, где $i = \overline{1, n}$, имеют порядковые номера $j = \overline{1, k}$, где k — число компонентов в i -й конфигурации. В соответствии со структурной схемой, показанной на рис. 2, компоненты конфигурации через ВСК формируют для модуля мониторинга частные индексы готовности компонентов s_j . На рис. 2 M_1, M_2, M_3 — это функции алгоритмов мониторинга соответствующих уровней.

Алгоритмы мониторинга F_m (только по данным ВСК — случай M_1 , либо путем многоуровневой дополнительной обработки результатов тестов ВСК — случаи M_2 и M_3) формируют буфер индексов готовности (БИГ) i -й конфигурации $S_i = [s_1 \ s_2 \ \dots \ s_j \ \dots \ s_n]$.

Для готовности супервизора необходима готовность всех компонентов подконтрольной ему конфигурации K_i , т. е. интегральный индекс готовности (ИИГ) i -го СК будет определяться логическим произведением ИГ всех компонентов, входящих в конфигурацию:

$$\prod_{j=1}^{k_i} S_i^* = \prod_{j=1}^{k_i} F_m(K_i \times S_i) = K_i \times F_m \prod_{j=1}^{k_i} s_j. \quad (6)$$

Формирование ИГ реализуется следующим образом. При инициализации работы комплекса управляющий модуль СК (если модуль мониторинга входит в его состав) или модуль СПО УИ (если мониторинг не входит в состав СК) формирует соответствующий сигнал на запуск процедур тестирования соотнесенного с ним оборудования и/или программ-

Таблица 4
Table 4

Буфер индексов готовности
Availability index buffer

№ компонентов	1	2	3	4	...	k
ИГ	1	1	0	1	...	1

ных средств. Вычислители через драйверы устройств с заданным тактом проводят опрос всего подключенного оборудования и периферии, получают от них информацию о работоспособности и формируют БИГ компонентов конфигурации в виде, показанном в табл. 4.

Формирование ИГ программных средств происходит аналогичным образом: средство мониторинга состояния ядра ОСРВ проводит опрос всех программных модулей ФПО, получая от них информацию о работоспособности, и формирует индекс готовности ФПО.

На основе ИГ компонентов СК, составляющих БИГ, формируется ИИГ конфигурации, определяемый в самом простом случае как конъюнкция ИГ всех компонентов, входящих в конфигурацию. ИИГ СК характеризуют текущее состояние готовности соотнесенных с СК конфигураций на каждом цикле работы СУИ и используются в процедуре арбитража СК.

Принципы формирования показателей функциональной эффективности

Под *показателями функциональной эффективности* (ПФЭ) [13] понимаются показатели, интегрально характеризующие уровень возможно достижимых эксплуатационно-технических характеристик компонентов. ПФЭ содержат в численном виде информацию об эффективности соответствующих ресурсов КБО для данного режима работы. Значения или правила оперативного вычисления ПФЭ назначаются на этапе разработки КБО исходя из логики работы комплекса и характеризуют группу тех или иных компонентов по каким-либо отличительным признакам (характеристикам). Разработчиком КБО методом сравнения ПФЭ отдельных компонентов (их наборов) между собой формируются "конкурсные" списки, определяющие приоритет использования соответствующих компонентов и систем в зависимости от режима работы и/или состояния КБО, а также определяются правила выбора

данных из "конкурсных" списков в процессе функционирования КБО.

Содержание и формы ПФЭ зависят от типа и принципа действия компонентов. В общем случае можно выделить:

1) целевые ПФЭ, формализующие осуществимость и уровень выполнения задач КБО по предназначению (точность, оптимальность, ресурсоемкость, наличие ресурсов для повторного использования, эргономичность, эффективность управления и др.);

2) эксплуатационные ПФЭ, отражающие надежность-стоимостные характеристики (показатели надежности выполнения задач, актуальные уровни физического, программного и функционального резервирования, остаток ресурса, сохраняемость и/или восстанавливаемость компонентов и их частей);

3) вычислительно-временные ПФЭ, отражающие уровень рационализации выполнения задач с позиции использования вычислительных и коммуникационных процессов (операционное время, объемы данных и резервируемой памяти, битрейты каналов связи и др.).

Хорошим подспорьем для реализации фиксирования и хранения различных ПФЭ является идеология систем объективного контроля функциональных элементов (СОК ФЭ), выполненных на встраиваемых в устройства (датчик, вычислитель, исполнитель и пр.) чипах [21].

С формальной точки зрения заданный ПФЭ i -й конфигурации — это заранее определенная таблица вида $P_i = [p_1 p_2 \dots p_j \dots p_k]$, хранящая ПФЭ отдельных компонентов p_j , входящих в состав конфигурации.

Показатели функциональной эффективности хранятся в каждом супервизоре в специальных *таблицах ПФЭ* вида, показанного в табл. 5.

Столбцы таблицы соответствуют компонентам КБО. В ячейки таблицы вносятся ПФЭ компонентов в физических или нормированных величинах.

Таблицы ПФЭ формируются на этапе проектирования СУИ и по аналогии с таблицами конфигурации на первых этапах могут быть

Таблица 5
Table 5

Таблица показателей функциональной эффективности
Table of functional efficiency indicators

№ компонентов	1	2	3	4	...	k
ПФЭ	0,1	2,2	12	4,1	...	...

Обобщенная таблица ПФЭ
Summary table of FEI

	Группы												
	Вычислители				ФПО				Компоненты КБО				КБО
№ компонентов	1	2	...	$k_{\text{в}}$	1	2	...	$k_{\text{ф}}$	1	2	...	$k_{\text{к}}$	ИПФЭ
ПФЭ	4	3	...	1	1	2	...	6	0,1	2,2	...	12	1,57

сформированы ПФЭ отдельных групп ресурсов комплекса. Далее возможно формирование ПФЭ по группам компонентов, имеющих однотипные показатели. После этого составляются обобщенные таблицы ПФЭ всей конфигурации, а также вычисляются интегральные ПФЭ (ИПФЭ) путем использования выбранного метода суммирования или усреднения в соответствии, например, с табл. 6.

Механизм определения ИПФЭ (на примере КБО самолета транспортной категории) более подробно описан в следующем разделе.

Формирователь режимов КБО

В целях адаптации СУИ к режимам работы и внешним командам в процессе работы КБО проводится оценка следующих факторов:

- этапы полета воздушного судна (запуск, руление, взлет, набор высоты, полет по маршруту, снижение, посадка и т. д.);
- сервисные режимы работы воздушного судна (предполетная проверка, опробование двигателя, заправка топливом и специальными жидкостями, автоматизированный сервисный контроль и т. д.);
- аварийные режимы работы оборудования (пожар, повреждение или останов двигателей, отказ систем и агрегатов и т. д.);

- установленные режимы критичности состояний воздушного судна (штатный, отказный, аварийный, катастрофический);
- режимы работы отдельных комплексов и систем КБО (от наиболее важных, таких как пилотажно-навигационный комплекс (ПНК), система жизнеобеспечения и др., до второстепенных, например, услуги и поддержка пассажиров).

Предлагается схема формирования ИПФЭ каждой i -й конфигурации, представленная на рис. 3.

На рис. 3 обозначены:

$P_i = [p_1 \ p_2 \ \dots \ p_j \ \dots \ p_k]$ — заданные ПФЭ конфигурации, т. е. заранее определенная таблица ПФЭ конфигурации, хранящая ПФЭ отдельных компонентов p_j , входящих в ее состав;

$P_i^* = [p_1^* \ p_2^* \ \dots \ p_j^* \ \dots \ p_k^*]$ — текущие ПФЭ конфигурации (таблица ПФЭ конфигурации с учетом состояния готовности ее компонентов и режимов работы КБО);

$F_a = f(R_1, \dots, R_M) = f(R_m)$ — функция формирования *индекса режима* (алгоритм приоритета режимов), где R_m — параметры, характеризующие текущее состояние режимов работы КБО, $m = \overline{1, M}$, M — число групп режимов КБО (этап полета, режим аварийности, режим работы ПНК и т. д.)¹;

$F_b = f(F_a)$ — функция формирования текущего *буфера приоритета* (выбор одного из наборов формирующих коэффициентов эффективности (ФКЭ) для выбранного режима из таблицы режимов в зависимости от индекса режима F_a);
 $B_r = [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_j \ \dots \ b_k]$ — буфер приоритета, хранящий

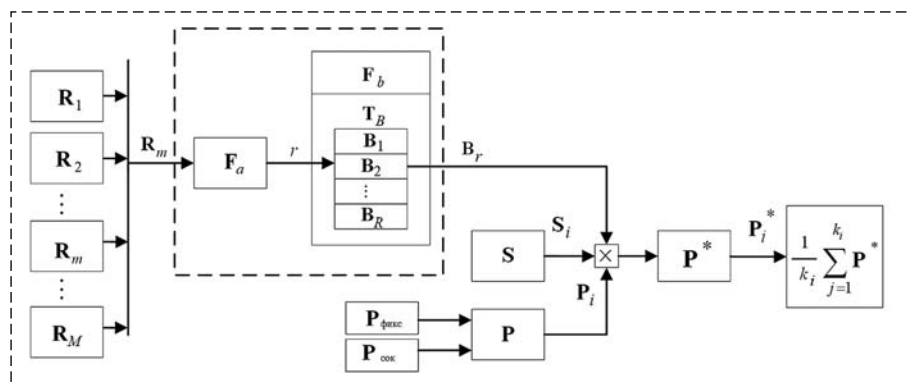


Рис. 3. Схема формирования ИПФЭ, адаптивная к режимам КБО
Fig. 3. The scheme of Integral FEI formation, adaptive to OEC modes

¹Алгоритм формирования функции F_a является самостоятельной задачей и выносится за рамки данной статьи.

информацию о наборе ФКЭ b_j , повышающих, понижающих или обнуляющих текущие ПФЭ компонентов конфигурации, где $r = \overline{1, R}$ — номер режима СУИ в формирователе режимов (номер строки таблицы режимов T_B);

$$T_B = [B_1 \ B_2 \ \dots \ B_R]^T = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1k} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{R1} & b_{R2} & \dots & b_{Rk} \end{bmatrix} \quad —$$

таблица режимов, номер r каждой строки которой соответствует индексу режима $r = F_a(R_1, \dots, R_M)$, сформированного алгоритмом приоритета режимов, а каждая строка $B_r = [b_{r1} \ b_{r2} \ \dots \ b_{rk}]$ — буфер приоритета с набором ФКЭ, соответствующих этому режиму.

Таким образом, согласно рис. 3 ИПФЭ i -й конфигурации будет определяться (в самом простом случае) как среднее арифметическое всех ПФЭ компонентов, входящих в таблицу текущих ПФЭ конфигурации с учетом состояния готовности ее компонентов и режимов работы КБО:

$$\begin{aligned} \frac{1}{k_i} \sum_{j=1}^{k_i} P_i^* &= \frac{1}{k_i} F_b(r) P_i S_i = \\ &= \frac{1}{k_i} F_b [F_a(R_1, \dots, R_M)] P_i S_i. \end{aligned} \tag{7}$$

Выделенную на рис. 3 штриховой рамкой часть схемы назовем формирователем режи-

мов (ФР), который реализуется путем обмена информацией с соответствующими подсистемами и приложениями посредством существующих протоколов и интерфейсов.

Таким образом, в состав формирователя режимов входят:

а) *индекс режима (ИР)*, определяющий порядковый номер обобщенного режима СУИ, представляемый натуральным числом, обозначающий, какой из буферов приоритета выбирается для коррекции ПФЭ;

б) *буфер приоритета (БП)*, который содержит коэффициенты, повышающие (понижающие, обнуляющие) вклад ПФЭ компонентов конфигурации в ИПФЭ;

в) *таблица режимов*, осуществляющая хранение буферов приоритета для всех вариантов режимов СУИ;

г) *алгоритм приоритета режимов (АПР)*, который определяет выбор того или иного БП (набора ФКЭ) в зависимости от режима работы КБО, а также команд экипажа. Результат работы АПР реализуется в виде ИР. АПР формируется на этапе проектирования исходя из логики работы КБО и является самостоятельной задачей разработки СУИ.

Схема, поясняющая процесс работы ФР, представлена на рис. 4. На схеме обозначены подсистемы самолета: СЖО — система жиз-

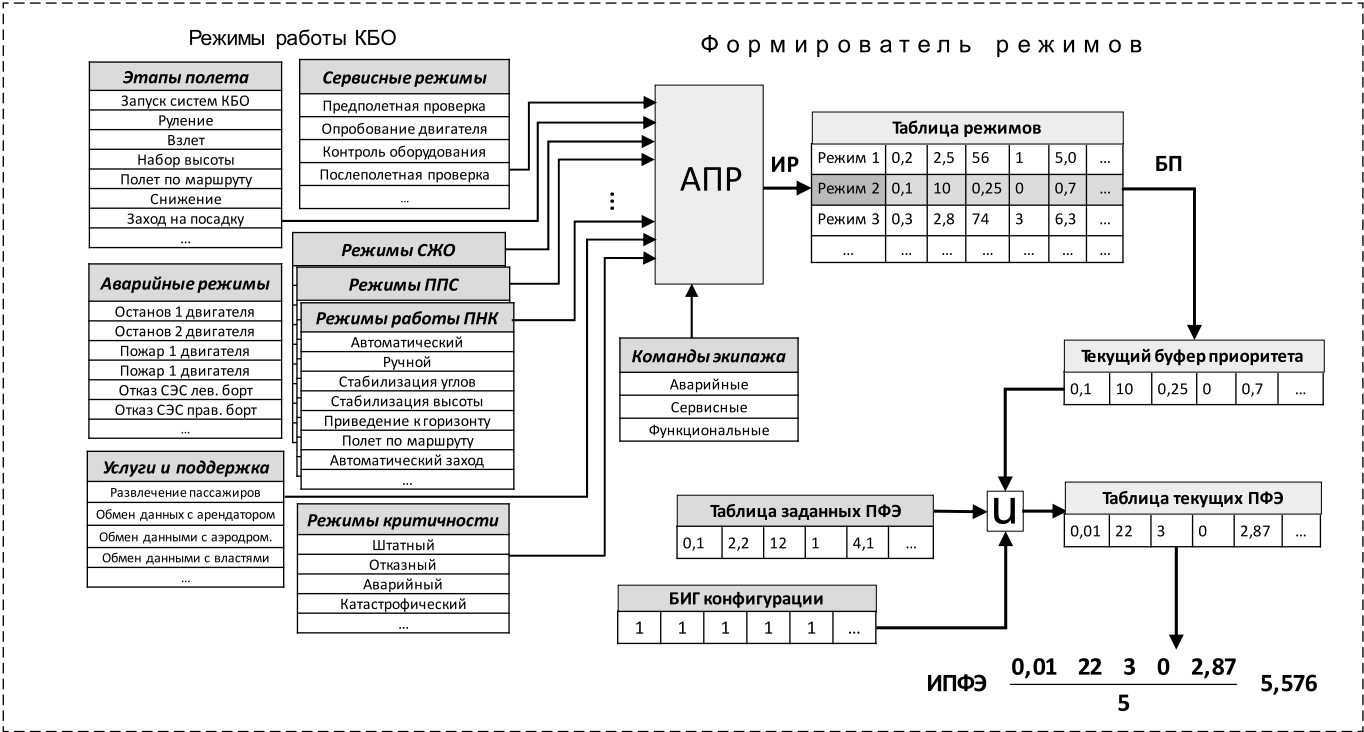


Рис. 4. Пример формирования ИПФЭ, адаптивного к режимам работы КБО самолета

Fig. 4. An example of a FEI formation that is adaptive to the aircraft OEC mode

необеспечения экипажа; ППС — противопожарная система; СЭС — система электроснабжения; ПНК — пилотажно-навигационный комплекс.

Таким образом, в процессе формирования ПФЭ могут учитываться различные условия и режимы работы КБО, приоритеты по группам компонентов, а также индивидуальные текущие ПФЭ отдельных компонентов.

Заключение

В статье предложены формы таблиц конфигураций и правила их заполнения, ориентированные на использование в супервизорах конфигураций. Сформулированы общие принципы организации мониторинга избыточных ресурсов, позволяющие использовать возможности как традиционных встроенных средств контроля, так и более развитых алгоритмических решений. Разработаны и детализированы принципы формирования индексов готовности и показателей функциональной эффективности. Предусмотрен, в частности, механизм учета разнообразия задач и режимов КБО: этапов полета, аварийных ситуаций, сервисных услуг и поддержки, режимов жизнеобеспечения, работы ПНК и пр. Предусмотрен формирователь режимов, адаптирующий реконfigurирование системы к условиям его использования. Предложенные решения могут быть использованы в системах автоматизированного проектирования комплексов оборудования, систем безопасности полетов, управления общесамолетным оборудованием, программно-управляемых систем радиосвязного оборудования, многоспектральных бортовых систем разведки, целеуказания и управления авиационным вооружением и специальными целевыми нагрузками перспективных авиационных комплексов.

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. Парамонов П. В., Жаринов И. О. Интегрированные бортовые вычислительные системы: обзор современного состояния и анализ перспектив развития в авиационном приборостроении // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 2 (84). С. 1—17.

3. **Digital Avionics Handbook**. 3-d ed. / Ed. by C. R. Spitzer, U. Ferrell, T. Ferrell. London, N. Y.: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015.
4. **Федосов Е. А., Косьянчук В. В., Сельвесюк Н. И.** Интегрированная модульная авионика // Радиоэлектронные технологии, 2015. № 1. С. 66—71.
5. **DO-297**. Integrated modular avionics (IMA) development guidance and certification considerations. Washington: RTCA Inc., 2005.
6. **Hainaut D.** Towards the Next Generation of Integrated Modular Avionics // Sixth European Aeronautics Days. Madrid. Spain. 2011. P. 135.
7. **Bukov V., Kutahov V., Bekkiev A.** Avionics of Zero Maintenance Equipment // 27th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (Nice, France, ICAS 2010). P. 7—11.
8. **Бронников А. М.** Эффективность технической эксплуатации необслуживаемой в межсервисный период бортовой системы воздушного судна // Научный вестник МГТУ ГА. 2017.
9. **Redding L.** An Introduction to Integrated Vehicle Health Management — A Perspective from Literature // Integrated Vehicle Health Management: Perspectives on an Emerging Field / Ed. by I. K. Jennions. SAE Int., 2011. P. 17—26.
10. **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.
11. **ГОСТ Р ИСО/МЭК 19762-1-2011.** Информационные технологии. Технологии автоматической идентификации и сбора данных (АИСД). Гармонизированный словарь. Ч. 1. Общие термины в области АИСД. Москва: Стандартинформ, 2012.
12. **Шубинский И. Б.** Надежные отказоустойчивые информационные системы. Методы синтеза. М.: Журнал Надежность, 2016. С. 39.
13. **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. 72—82.
14. **Буков В. Н., Бронников А. М., Агеев А. М., Гамаюнов И. Ф.** Аналитический подход к формированию конфигураций технических систем // А и Т. 2017. № 9. С. 67—83.
15. **Агеев А. М.** Конfigurирование избыточных комплексов бортового оборудования // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2018. № 4. С. 175—192.
16. **Буков В. Н., Бронников А. М., Агеев А. М., Гамаюнов И. Ф.** Интеграция комплекса оборудования выбранной конфигурации // А и Т. 2019. № 4. С. 105—125.
17. **Агеев А. М., Буков В. Н., Гамаюнов И. Ф., Шурман А. В.** Управление избыточностью вычислительных ресурсов интегрированной модульной авионики // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. Т. 20, № 6. С. 376—383.
18. **Клюев В. В., Пархоменко П. П., Абрамчик В. Е.** и др. Технические средства диагностирования: справочник / Под общей редакцией В. В. Клюева. М.: Машиностроение, 1989.
19. **Буков В. Н., Озеров Е. В., Шурман В. А.** Парный мониторинг избыточных технических систем // А и Т. 2020. № 1. С. 93—116.
20. **Буков В. Н., Бронников А. М., Сельвесюк Н. И.** Алгоритм локализации отказов бортового комплекса на основе смешанных направленных графов // Проблемы безопасности полетов. 2010. № 2. С. 57—71.
21. **Джанджгава Г. И., Дядищев А. В., Гарифов Р. Ш.** О концепции мониторинга технического состояния изделий авионики на основе применения средств и методов физической диагностики // Идеи и новации. 2018. Т. 6, № 3. С. 64—68.

Principles of Storing and Monitoring Configuration Information in the Task of On-Board Equipment Complex Redundancy Managing

A. M. Ageev, Cand. Tech. Sc., Associate Professor, ageev_bbc@mail.ru,
Military Educational and Scientific Center "N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy",
Voronezh Branch, Voronezh, 394064, Russian Federation,

Corresponding author: **Ageev Andrey M.**, Cand. Tech. Sc., Associate Professor, Military Educational and Scientific Center "N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy", e-mail: ageev_bbc@mail.ru

Accepted on July 05, 2021

Abstract

The article proposes the principles of the main structural component's formation for the implementation of the task of managing the on-board equipment complex's (OEC) redundant resources: configurations tables, readiness indices and functional efficiency indicators of the software and hardware equipment components, allowing to formalize the processes of their development and use in the task of managing the excess on-board equipment complex resources. The separation of redundant components into groups of resources is proposed: computing modules, operating system core components, onboard software components, peripheral switching system components, hardware peripheral components. The general organization of redundant resources monitoring is formulated, which allows using the schemes and capabilities of both traditional built-in controls (the lower level of monitoring) and more advanced algorithmic solutions based on the logical processing of control results (the middle and upper levels of monitoring). The formation mechanisms, as well as the forms of configuration tables for hardware components and on-board applications, as well as the rules for filling them, focused on the use of configuration supervisors, are proposed. The principles of readiness indices and functional efficiency indicators forming have been developed and detailed, allowing to implement in the software environment the accounting of various factors that determine the capabilities and effectiveness of various computing tools and OEC configurations. A method for correcting the configurations functional efficiency indicator due to the mode generator, which adapts the complex reconfiguration to the conditions of its use, the tasks to be solved, and the operator's commands, is proposed. An example of considering the variety of tasks and modes of the OEC of an aircraft: flight stages, emergency situations, services and support, life support modes, the operation of the flight and navigation complex, as well as the crew control commands, is given. The proposed solutions can be used in computer-aided design systems for equipment complexes, flight safety systems, control of general aircraft equipment, software-controlled radio communication equipment systems, multispectral onboard reconnaissance systems, target designation and control of aviation weapons and special target loads of promising aviation complexes.

Keywords: on-board equipment complex, redundancy management, status monitoring, configuration table, readiness indicator, functional efficiency indicator

For citation:

Ageev A. M. Principles of Storing and Monitoring Configuration Information in the Task of On-Board Equipment Complex Redundancy Managing, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 1, pp. 45–55.

DOI: 10.17587/mau.23.45-55

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. Paramonov P. V., Zharinov I. O. *Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki*, 2013, no. 2 (84), pp. 1–17 (in Russian).
3. Digital Avionics Handbook. 3-d ed. / Ed. by C. R. Spitzer, U. Ferrell, T. Ferrell, London, N. Y., CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015.
4. Fedosov E. A., Kos'yanchuk V. V., Sel'vesyuk N. I. *Radioelektronnyye Tekhnologii*, 2015, no. 1, pp. 66–71 (in Russian).
5. DO-297. Integrated modular avionics (IMA) development guidance and certification considerations, Washington, RTCA Inc., 2005.
6. Hainaut D. Towards the Next Generation of Integrated Modular Avionics, Sixth European Aeronautics Days, Madrid, Spain. 30 March – 1 April, 2011, pp. 135.
7. Bukov V., Kutahov V., Bekkiev A. Avionics of Zero Maintenance Equipment, *27th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (Nice, France, ICAS 2010)*, pp. 7–11.
8. Bronnikov A. M. *Nauchnyj vestnik MGTU GA*, 2017 (in Russian).
9. Redding L. An Introduction to Integrated Vehicle Health Management — A Perspective from Literature, Integrated Vehicle Health Management: Perspectives on an Emerging Field, Ed. by I. K. Jennions. SAE Int., 2011, pp. 17–26.
10. Ezhilarasu C. M., Zakwan Skaf Z., Jennions I. K. The Application of Reasoning To Aerospace Integrated Vehicle Health Management: Challenges and opportunities, *Progress in Aerospace Sciences*, 2019, no. 105, pp. 60–73.
11. GOST R ISO / IEC 19762-1-2011. Information Technology. Automatic identification and data collection technologies (AISD). Harmonized dictionary. Part 1. General terms in the field of AISD., IDT, 2008 (in Russian).
12. Shubinskij I. B. Nadezhnye otkazoustojchivye informacionnye sistemy. Metody sinteza, Moscow, ZHurnal Nadezhnost', 2016, 39 p. (in Russian).
13. Ageev A. M., Bronnikov A. M., Bukov V. N., Gamayunov I. F. *Izv. RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2017, no. 3, pp. 72–82 (in Russian).
14. Bukov V. N., Bronnikov A. M., Ageev A. M., Gamayunov I. F. *A i T*, 2017, no. 9, pp. 67–83 (in Russian).
15. Ageev A. M. *Izv. RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2018, no. 4, pp. 175–192 (in Russian).
16. Bukov V. N., Bronnikov A. M., Ageev A. M., Gamayunov I. F. *A i T*, 2019, no. 4, pp. 105–125 (in Russian).
17. Ageev A. M., Bukov V. N., Gamayunov I. F., Shurman A. V. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 6, pp. 376–383 (in Russian).
18. Klyuev V. V., Parhomenko P. P., Abramchik V. E. *Tekhnicheskie sredstva diagnostirovaniya: spravochnik*, Moscow, Mashinostroenie, 1989 (in Russian).
19. Bukov V. N., Ozerov E. V., Shurman V. A. *A i T*, 2020, no. 1, pp. 93–116 (in Russian).
20. Bukov V. N., Bronnikov A. M., Sel'vesyuk N. I. *Problemy bezopasnosti poletov*, 2010, no. 2, pp. 57–71 (in Russian).
21. Dzhandzhgava G. I., Dyadishchev A. V., Garifov R. Sh. *Idei i novacii*, 2018, vol. 6, no. 3, pp. 64–68 (in Russian).