

УДК 629.7.05

А.Р. Дегтярев, С.К. Киселев

НАДЕЖНОСТЬ РЕКОНФИГУРИРУЮЩИХСЯ КОМПЛЕКСОВ ИНТЕГРИРОВАННОЙ МОДУЛЬНОЙ АВИОНИКИ

Дегтярев Алексей Робертович, аспирант Ульяновского государственного технического университета, окончил факультет информационных систем и технологий УлГТУ, инженер АО «УКБП». Специализируется в области создания и разработки аппаратуры систем летательных аппаратов и наземной техники. [e-mail: alexmind@rambler.ru].

Киселев Сергей Константинович, доктор технических наук, начальник Управления информатизации УлГТУ, профессор кафедры «Измерительно-вычислительные комплексы» УлГТУ. Окончил Ульяновский политехнический институт по специальности «Авиаприборостроение». Область научных интересов – разработка методов, моделей, алгоритмов, оборудования для автоматизации производства, диагностики, тестирования авиационных приборов, организация НИР и ОКР. Имеет монографии, статьи и патенты в области приборостроения. [e-mail: ksk@ulstu.ru].

Аннотация

В статье кратко рассмотрены проблемы расчета надежности для многопроцессорных систем. Обозначены недостатки статистического метода расчета применительно к реконфигурирующимся комплексам бортового оборудования (КБО). Описана процедура проведения предварительной оценки безопасности проектируемой системы. В качестве примера взят КБО вертолета, который способен функционировать в режиме крейсерского полета и режиме взлета/посадки. Представлено описание режимов его работы, построен граф функциональной и аппаратной структуры, учитывающий критичность функций, потоки данных между ними и особенности аппаратной платформы. Проведена оценка эффективности разработанных алгоритмов реконфигурации путем анализа деревьев неисправностей для классической федеративной архитектуры с двойным резервированием и архитектуры интегрированной модульной авионики, состоящей из одного крейта с резервированным коммутатором. Построены соответствующие деревья и представлены численные результаты расчетов надежности. Даны рекомендации по усовершенствованию алгоритмов реконфигурации с целью дальнейшего повышения показателей надежности. Обозначена невозможность реализации реконфигурации на существующих комплексах с динамически перестраиваемой архитектурой, не обеспечивающих повышенные требования к надежности комплексов и не соответствующих новым стандартам проектирования аппаратуры авиационного применения.

Ключевые слова: многопроцессорные вычислительные системы, реконфигурация, надежность, дерево неисправностей.

RELIABILITY OF INTEGRATED MODULAR AVIONICS RECONFIGURABLE COMPLEXES

Aleksei Robertovich Degtyarev, Post-Graduate Student of Ulyanovsk State Technical University; graduated from the Faculty of Information Systems and Technologies of Ulyanovsk State Technical University; an engineer of JSC Ulyanovsk Instrument Manufacturing Design Bureau; specializes in the field of creation and development of aircraft and land vehicle hardware. e-mail: alexmind@rambler.ru.

Sergei Konstantinovich Kiselev, Doctor of Engineering, Head of Informatization Department at Ulyanovsk State Technical University, Professor at the Department of Measuring and Computing Systems; graduated from Ulyanovsk Polytechnic Institute with a specialty in Aircraft Instruments Engineering; the area of his scientific interests relates to the development of methods, models, algorithms, and equipment for automation of manufacturing, diagnosing, and testing of aircraft instruments, R & D organization; an author of monographs, a large number of papers, and patents in the field of instrumentation. e-mail: ksk@ulstu.ru.

Abstract

This paper briefly outlines the problems of calculations reliability for multiprocessor systems. The authors show disadvantages of the statistical calculations method for reconfigurable onboard equipment complexes. The preliminary system safety assessment procedure for the system developed is described. The helicopter onboard equipment complex, which is capable to function in cruise flight mode and in modes of landing and takeoff, was considered as an example. Respective hardware

and functional graph was built. The graph takes into account functions criticality, data streams between them, and specific hardware features. Operating modes of the complex are also described. Evaluation of developed reconfiguration algorithms effectiveness was implemented with the use of Fault Tree Analysis (FTA) for the traditional federative architecture with double reservation and for the integrated modular avionics architecture that consists of a crate with the reserved commutation module. Respective fault trees were built and the numerical results of reliability evaluation were presented. In order to improve algorithms for performing better reliability, some recommendations are given. The authors also show the impossibility of implementing the reconfigurable architecture on the basis of the existing complexes with the dynamically reconstructive architecture. The architecture doesn't meet the requirements of complexes reliability and doesn't comply with modern standards for airborne equipment development.

Key words: multiprocessor computing system, reconfiguration, reliability, fault tree.

ВВЕДЕНИЕ

Перспективные динамически реконфигурирующиеся комплексы бортового оборудования (КБО) на основе концепции интегрированной модульной авионики (ИМА) представляют собой следующий шаг в решении проблемы обеспечения повышенного уровня отказоустойчивости, который не может быть достигнут при помощи обычного резервирования [1].

Для хорошо изученных классов многопроцессорных систем (МС) разработаны специализированные методы расчета показателей надежности [2]. Расчет таких показателей для систем, отличных от этих классов, производится, как правило, статистическими методами. Особенностью расчета надежности реконфигурируемых МС является необходимость расчета показателей не только для аппаратной и программной частей комплекса в отдельности, но и для всей системы в целом. Более того, такой расчет должен учитывать работу механизмов реконфигурации и их собственную надежность.

1 СТАТИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ

В работах [3, 4] предлагается статистический метод, основанный на проведении экспериментов с определенного вида моделями, отражающими реакцию МС на возникновение отказов.

Один из наиболее используемых показателей надежности – вероятность безотказной работы системы на протяжении заданного промежутка времени. Начальные данные для расчета – вероятности безотказной работы элементов системы за тот же промежуток времени и модель поведения системы, отражающей зависимость состояния МС от состояния ее элементов. Состояние МС и состояние ее элементов представляются булевыми переменными (единица – работоспособное состояние, ноль – отказ). Совокупность булевых переменных, представляющих состояния элементов МС, называют вектором состояния системы. При выполнении каждого статистического эксперимента генератор создает двоичный вектор, рассматриваемый моделью в качестве вектора состояния системы. Собранный статистика отказов системы позволяет рассчитать показатели надежности. Одной из наиболее эффективных моделей поведения МС в потоке отказов авторы считают графологическую модель (GL-модель) [4].

Основным недостатком данного метода применительно к реконфигурирующимся КБО ИМА является огром-

ное количество тестовых векторов состояния системы $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, где (x_1, x_2, \dots, x_n) – булевы переменные, отражающие состояние процессоров ($x_i = 0$, если i -й процессор отказал, $x_i = 1$, если i -й процессор работоспособен, $i = 1, \dots, n$). Более того, работоспособность комплекса характеризуется не только наличием или отсутствием отказавших процессоров, но и правильностью работы программных приложений, которые не зависят от аппаратной платформы [5].

Другая сложность заключается в том, что на данный момент не существует систем автоматизированного проектирования, которые способны учитывать возможность реконфигурации. Поэтому расчет тестовых векторов, пусть и с использованием вычислительной техники, становится практически невыполнимой задачей, особенно если учитывать необходимость 100% покрытия всех возможных комбинаций, необходимого для соответствия комплекса международным стандартам проектирования аппаратуры.

2 ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ КБО ИМА

Основным документом, определяющим инструкции и методы проведения оценки безопасности для обеспечения сертификации гражданского самолета, является «Руководство 4761 по методам оценки безопасности систем и бортового оборудования воздушных судов гражданской авиации» [6]. Согласно данному документу для демонстрации соответствия системы качественным и количественным требованиям по обеспечению отказобезопасности необходимо провести предварительную оценку безопасности.

Предварительная оценка безопасности (Preliminary System Safety Assessment – PSSA) необходима для определения перечня отказных состояний комплекса, а также условий их возникновения.

На первом этапе проведения PSSA проектируемого реконфигурирующегося КБО необходимо определить выполняемые им функции, состав и структуру аппаратной платформы и режимы ее работы. Платформа КБО представляет собой набор базовых вычислительных модулей (ВМ), размещенных в едином крейте, и может быть описана неориентированным графом $GS = (V, W)$, где вершины $v \in V$ соответствуют модулям, а ребра $w \in W$ – каналам связи между ними (см. рис. 1). При этом каждый

модуль выполняет какой-либо набор функциональных приложений $u \in Y$. Для примера был взят КБО вертолета, который может функционировать в режимах взлета/посадки и крейсерского полета.

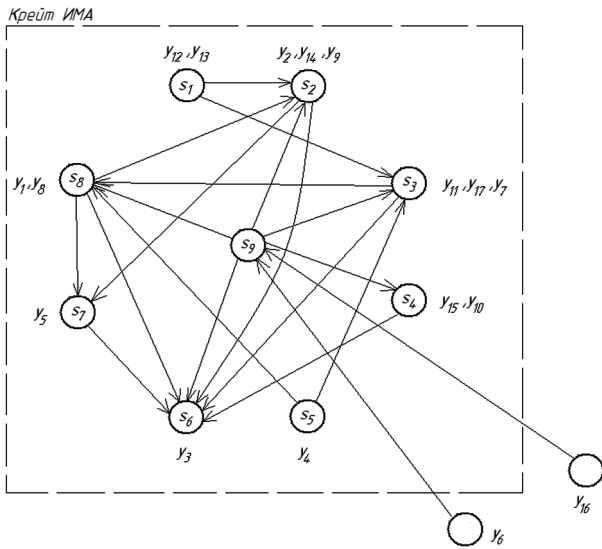


Рис. 1. Структура крейта ИМА:
 y_1 – y_{17} – функции КБО; s_1 – s_9 – базовые ВМ

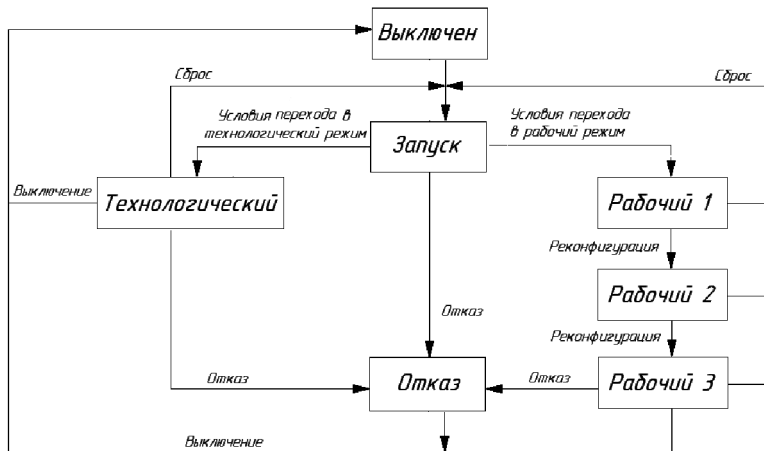


Рис. 2. Схема режимов работы платформы реконфигурирующегося КБО ИМА

Платформа может работать в двух основных режимах – рабочем и технологическом. В рабочем режиме выполняются функции $u \in Y$, а также проводится текущий контроль собственной исправности. Рабочий режим подразделяется на несколько подрежимов, в которые комплекс переходит при осуществлении какого-либо вида реконфигурации. Количество этих подрежимов Q определяется разработчиком, задается в техническом задании и заранее известно. Перечень функций $y_q \in Y_q$, выполняющихся в подрежиме $q \in Q$, так же определен и может быть представлен в виде неориентированного графа функциональной структуры $G_{Fq} = (Y_q, Z_q)$, где $z \in Z_q$ – дуга, соответствующая информационной связи между двумя функциями из множества Y_q . При этом критерии осуществления реконфигурации должны учитывать критичность функций $k \in K$, количество отказавших модулей $m \in M$ и приложений $n \in N$, а также установленный режим полета $q \in Q$. Общая схема режимов работы платформы и условия перехода между ними представлены на рисунке 2.

Из режима «Выключен» после подачи питания КБО переходит в режим запуска, инициализирует программные и аппаратные компоненты, проводит встроенный контроль исправности и переходит по заданным условиям в рабочий или технологический режимы (загружается и запускается рабочий или технологический образы операционной системы реального времени – ОСРВ). В технологическом режиме платформа запускает системный раздел, обеспечивающий возможность загрузки данных в энергонезависимую память. При обнаружении в любом из режимов встроенным контролем неисправностей, которые могут повлиять на безопасное выполнение функциональных приложений, платформа запускает процесс реконфигурации в соответствии с выбранным критерием оптимальности и текущим состоянием комплекса, который характеризуется дополнительными параметрами, такими как количество отказавших модулей $m \in M$ и приложений $n \in N$, а также установленным ре-

Таблица 1

Классификация отказных состояний

Классификация отказного состояния по АП-25/CS-25	Обозначение	Вероятность возникновения	Численные показатели (на час полета), не менее
Без последствий/No safety effect	БП		
Усложнение условий полета/Minor	УУП	Вероятные/Probable	$1 \times E-03$
Сложная ситуация/Major	СС	Маловероятные/Remote	$1 \times E-05$
Аварийная ситуация/Hazardous	АС	Крайне маловероятные/Extremely Remote	$1 \times E-07$
Катастрофическая ситуация/Catastrophic	КС	Практически невероятные/Extremely Improbable	$1 \times E-09$

жимом полета $q \in Q$. Реконфигурация продолжается до тех пор, пока не будет исчерпан аппаратный ресурс, необходимый для переназначения задач, либо не произойдет такое количество отказов, при котором дальнейшее функционирование комплекса (выполнение задач с уровнями критичности k_1 и k_2 при $k \in K$) невозможно. В этом случае выставляется сигнал неисправности КБО.

На втором этапе определяется критичность отказных состояний комплекса. Согласно АП-25 [7], для отказных состояний системы справедлива классификация, приведенная в таблице 1, и соответствующие ей численные показатели вероятности возникновения. Такая классификация удовлетворяет требованиям стандарта на конструирование аппаратуры КТ-254 [8], в котором определены 5 уровней критичности выполняемых функций $k \in K$.

На третьем этапе производится построение и анализ деревьев неисправностей комплекса.

3 Надежность реконфигурирующихся КБО

Надежность реконфигурирующегося КБО исследовалась путем анализа деревьев неисправностей в соответствии с [6]. Анализ дерева неисправностей – дедуктивный анализ отказов, который сосредотачивается на одном конкретном нежелательном событии и позволяет определить причины этого события. Анализ дерева неисправностей – «нисходящая» процедура оценки системы, в которой формируется и оценивается качественная, а затем и количественная модель для отказного события.

Каждое конечное событие дерева неисправностей непосредственно является полным отказом одного функционального узла либо определенным видом отказа функционального узла. Вероятность отказа функционального узла определяется в соответствующем расчете надежности.

Для КБО, состоящего из двух крейтов ИМА, структура которых изображена на рисунке 1, конечным (базовым) событием дерева будет отказ какого-либо ВМ.

Поскольку программное обеспечение (ПО) таких комплексов разрабатывается по уровню А в соответствии с КТ-178В [9], вероятность необнаруженной ошибки в коде, приводящей к соответствующему событию в дереве неисправностей, считается событием практически невероятным ($1 \times E-09$). Поэтому данные виды отказов при анализе не включались в состав дерева.

Чтобы оценить эффективность разработанных алгоритмов реконфигурации, были построены и проанализированы деревья неисправностей для классической федеративной архитектуры с двойным резервированием и архитектуры ИМА, состоящей из одного крейта с резервированным коммутатором.

Дерево неисправностей для федеративной архитектуры (для одного блока) изображено на рисунке 3.

Поскольку все базовые ВМ идентичны друг другу, а отличия их от других типов модулей (например, модулей-концентраторов) в части интенсивности отказов минимальны (одного порядка), то интенсивность отказов каждого модуля λ_s принимается равной $1 \times E-006$. Поскольку коммутатор является самым уязвимым местом во всей системе, то он, как правило, резервируется дополнительно или проектируется из элементов повышенной надежности. Поэтому при расчетах его интенсивность отказов была принята $5 \times E-007$. Полный отказ федеративной системы происходит при отказе хотя бы одного модуля.

Дерево неисправностей для архитектуры ИМА (для одного крейта) изображено на рисунке 4.

Отказ крейта ИМА, аппаратная структура которого представлена на рисунке 1 и который поддерживает возможность реконфигурации по разработанным алгоритмам, произойдет, если откажут хотя бы три ВМ, поскольку для выполнения приложений $y \in Y$, которые относятся к уровням критичности k_1 и k_2 , необходимо четыре ВМ, в то время как остальные задачи исключаются из состава КБО при возникновении отказов (см. табл. 2).

Построения деревьев неисправностей и их расчеты проводились при помощи программы RAM Commander с параметрами относительной величины отсечения $1 \times E-006$, точности оптимизации 0,001 и продолжительности полета 1 ч. При этом для модулей задавались значения интенсивностей отказов λ_s при экспоненциальном законе распределения отказов.

Как видно из рисунков 3 и 4, вероятность отказа реконфигурируемого крейта ИМА более чем в 15 раз превосходит аналогичный показатель для блока федеративной архитектуры ($5 \times E-007$ у ИМА против $8,5 \times E-006$ у федеративной архитектуры). Более того, расчеты показали, что даже федеративная система с двойным резервированием блоков не обладает лучшими показателями надежности,

чем один реконфигурируемый крейт с резервированным коммутатором ($2,5 \times E-013$ у ИМА против $7,2 \times E-011$ у федеративной архитектуры).

Таким образом, реконфигурируемый крейт ИМА не только гораздо более надежен, но и более экономичен с точки зрения ресурсов аппаратуры (количество элементов, вес) и ремон-

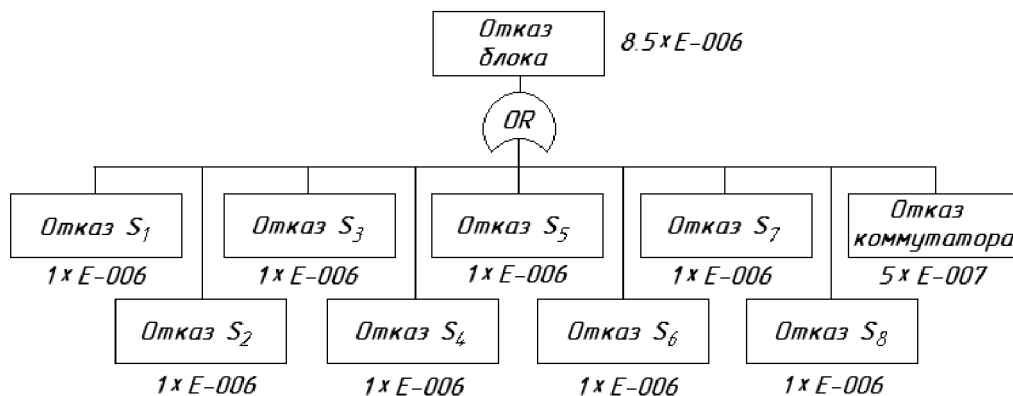


Рис. 3. Дерево неисправностей блока федеративной архитектуры

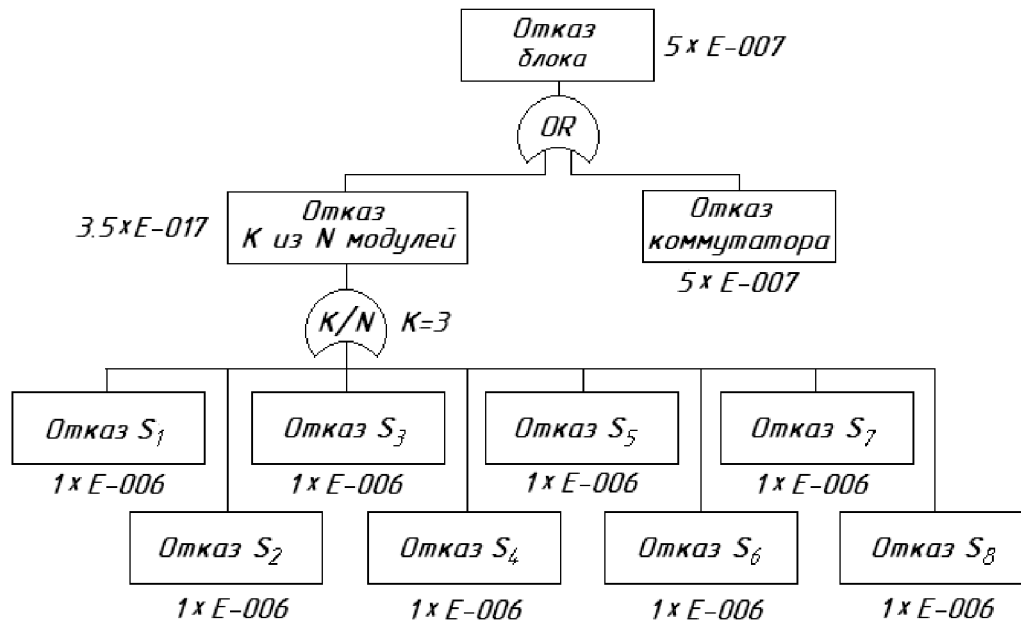


Рис. 4. Дерево неисправностей блока архитектуры ИМА

топригодности, так как его основу составляют идентичные ВМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для усовершенствования разработанных алгоритмов реконфигурации КБО ИМА, а следовательно, и повышения его надежности, необходимо решить задачу оптимального распределения приложений одновременно по множеству критериев (минимальная нагрузка сети передачи данных, минимальная нагрузка процессоров, минимальная нагрузка памяти и т. д.). При этом возможно разделение многомерной функциональной задачи на отдельные подзадачи, которые требуют обеспечения каких-то частных функционалов оптимальности.

Повышение эффективности разработанных алгоритмов также может быть достигнуто путем учета специфики управления ОСРВ и типа выбранной МС, а также совершенствованием ее механизмов контроля исправной работы комплекса. Внесением дополнительных условий можно добиться частичной реконфигурации, когда система перераспределяет не все функции КБО, а только функ-

ции, принадлежащие отказавшим модулям. Выборочное резервирование отдельных компонентов крейта позволит добиться еще больших показателей надежности проектируемой системы.

Предлагаемые на сегодняшний день многопроцессорные вычислительные системы с динамически перестраиваемой архитектурой, подробно описанные в работах [10–12], не могут быть применены к рассматриваемым системам ИМА, поскольку они не обеспечивают повышенные требования к надежности комплексов и не соответствуют новым стандартам проектирования аппаратуры авиационного применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чуюнов Г.А., Косьянчук В.В., Сельвесюк Н.И. Перспективы развития комплексов бортового оборудования на базе интегрированной модульной авионики // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 3. – С. 55–62.
2. Об одном подходе к расчету надежности отказоустойчивых многопроцессорных систем / А.М. Романкевич [и др.] // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2002. – № 119. – С. 54–58.
3. Надежность технических систем : Справочник / Ю.К. Беляев [и др.]; под. ред. И.А. Ушакова. – М. : Радио и связь, 1985. – 608 с.
4. Оценка погрешности статистического расчета надежности ОМС, которым соответствуют иерархические GL-модели / А.М. Романкевич [и др.] // Радіоелектронні та комп'ютерні системи. – 2010. – № 7. – С. 142–146.
5. Дегтярев А.Р., Киселев С.К. Подходы к оценке надежности реконфигурируемых многопроцессорных комплексов интегрированной модульной авионики // Прикладные информационные системы: вторая Всероссийская НПК (г. Ульяновск, 25 мая–7 июня 2015 г.) : сб. науч. тр. / под. ред. Е.Н. Эгова. – Ульяновск : УлГТУ, 2015. – 533 с.

Таблица 2
Уровни критичности функций по КТ-254 для режима крейсерского полета

$k \in K$	Функции $y \in Y$					
k_1	13	11	12	17	4	3
k_2	2	1				
k_3	8	9	15			
k_4	10	5	7			
k_5	14					

Примечание – уровни критичности функций режима взлета/посадки не показаны

6. Руководство 4761 по методам оценки безопасности систем и бортового оборудования воздушных судов гражданской авиации – М. : ОАО Авиаиздат, 2010. – 264 с.

7. Авиационные правила. Часть 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории – М. : ОАО Авиаиздат, 2014. – 277 с.

8. Руководство по гарантии конструирования бортовой электронной аппаратуры КТ-254 – М. : ОАО Авиаиздат, 2011. – 86 с.

9. Квалификационные требования КТ-178В. Требования к программному обеспечению бортовой аппаратуры и систем при сертификации авиационной техники – М. : НИИАО, 2002. – 105 с.

10. Реконфигурируемые мультиконвейерные вычислительные структуры / И.А. Каляев [и др.] – Ростов-на-Дону : Издательство ЮНЦ РАН, 2008. – 393 с.

11. Каляев А.В., Левин И.И. Модульно-наращиваемые многопроцессорные системы со структурно-процедурной организацией вычислений. – М. : Янус-К, 2003. – 380 с.

12. Семейство базовых модулей для построения реконфигурируемых многопроцессорных вычислительных систем со структурно-процедурной организацией вычислений / И.В. Беседин [и др.] // Научный сервис в сети Интернет: технологии распределенных вычислений : матер. всерос. науч. конф. – М. : Издательство Московского университета, 2006. – С. 47–49.

REFERENCES

1. Chuianov G.A., Kosianchuk V.V., Selvesiuk N.I. Perspektivy razvitiia kompleksov bortovogo oborudovaniia na baze integrirovannoi modulnoi avioniki [Prospects of Development of Complex Onboard Equipment on the Basis of Integrated Modular Avionics]. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Proc. of Southern Federal University. Engineering Sciences], 2013. no. 3, pp. 55–62.

2. Romankevich A.M., Grol V.V., Karachun L.F. Ob odnom podkhode k raschetu nadezhnosti otkazoustoichivyykh mnogoprotsessornykh sistem [About an Approach to Calculating the Reliability of Fail-Tolerant Multiprocessor Systems]. *Avtomatizirovannye sistemy upravleniia i pribory avtomatiki* [Automated Control Systems and Automation Devices], 2002, no. 119, pp. 54–58.

3. Beliaev Yu.K., Bogatyrev V.A., Bolotin V.V. *Nadezhnost tekhnicheskikh sistem*. Spravochnik. Pod. red. I.A. Ushakova [Reliability of Engineering Systems. Guidance edited by I.A. Ushakov]. Moscow, Radio i Sviiaz Publ., 1985. 608 p.

4. Romankevich A.M., Grol V.V., Romankevich V.A., Feseniuk A.P. Otsenka pogreshnosti statisticheskogo rascheta nadezhnosti OMS, kotorym sootvetstvuiut ierarkhicheskie GL-modeli [Error Estimation of the Statistical Reliability Calculation of Fault-Tolerant Multiprocessor Systems Described by Hierarchical GL-

Models]. *Radioelektronni ta kompiuterni sistemi* [Electronic and Computer Systems], 2010, no. 7, pp. 142–146.

5. Degtiarev A.R., Kiselev S.K. Podkhody k otsenke nadezhnosti rekonfiguriruemyykh mnogoprotsessornykh kompleksov integrirovannoi modulnoi avioniki [Approaches to Evaluating the Reliability of Fail-Tolerant Reconfigurable Multiprocessor Systems of Integrated Modular Avionics]. *Prikladnye informatsionnye sistemy: vtoraiia Vserossiiskaia NPK: sb. nauch. tr. pod. red. E.N. Egova* (Ulyanovsk, 25 May – 7 June, 2015) [Proc. of the 2nd Russian Workshop and Conference on Applied Information Systems. Edited by E.N. Egov]. Ulyanovsk, UISTU Publ., 2015, 533 p.

6. *Rukovodstvo 4761 po metodam otsenki bezopasnosti sistem i bortovogo oborudovaniia vozdukhnykh sudov grazhdanskoi aviatsii* [Guidance 4761. Methods for Conducting the Safety Assessment on Airborne Systems and Equipment]. Moscow, OAO Aviaizdat Publ., 2010. 264 p.

7. *Aviatsionnye pravila. Chast 25. Normy letnoi godnosti samoletov transportnoi kategorii* [Aviation Regulations 25. Airworthiness Standard for Transport Category Aviation]. Moscow, OAO Aviaizdat Publ., 2014. 277 p.

8. *Rukovodstvo po garantii konstruirovaniia bortovoi elektronnoi apparatury KT-254* [Qualifying Requirements KT-254. Design Assurance Guidance for Airborne Electronic Hardware]. Moscow, OAO Aviaizdat, 2011. 86 p.

9. *Kvalifikatsionnye trebovaniia KT-178B. Trebovaniia k programmnomu obespecheniiu bortovoi apparatury i sistem pri sertifikatsii aviatsionnoi tekhniki* [Qualifying Requirements KT-178B. Evaluation of Aircraft Equipment and Systems Software for Compliance with the KT-178B Requirements]. Moscow, NIIAO Publ., 2002. 105 p.

10. Kalyaev I.A., Levin I.I., Semernikov E.A., Shmoilov V.I. *Rekonfiguriruemye multikonveiernye vychislitelnye struktury* [Reconfigurable Multipipeline Computing Structures]. Rostov-na-Donu, YuNTs RAN Publ., 2008. 393 p.

11. Kalaev A.V., Levin I.I. *Modulno-narashchivaemye mnogoprotsessornye sistemy so strukturno-protsedurnoi organizatsiei vychislenii* [Module-Extensible Multiprocessors with Structure-Based Procedural Computing]. Moscow, Yanus-K Publ., 2003. 380 p.

12. Besedin I.V. et al. Semeistvo bazovykh modulei dlia postroeniia rekonfiguriruemyykh mnogoprotsessornykh vychislitelnykh sistem so strukturno-protsedurnoi organizatsiei vychislenii [Baseline Module Family for the Building of Reconfigurable Multiprocessors with Structure-based Procedural Computing]. *Nauchnyi servis v seti Internet: tekhnologii raspredelennykh vychislenii. Mater. Vseros. nauch. konf.* [Proc. of the Russian Sci. Conf. on Scientific Service in the Internet Network: Distributed Calculation Technologies]. Moscow, Moscow University Publ., 2006, pp. 47–49.