

УДК 629.7.05

Д.В. Хакимов, С.К. Киселев

ОПТИМИЗАЦИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ КОМПЛЕКСОВ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Хакимов Дмитрий Валерьевич, окончил факультет информационных систем и технологий Ульяновского государственного технического университета. Аспирант кафедры «Измерительно-вычислительные комплексы» УлГТУ. Инженер комплексного отдела ООО НПП «ЦРТС». Имеет статьи в области оценки безопасности авионики и оптимизации структуры комплексов бортового оборудования. [e-mail: sense151015@mail.ru].

Киселев Сергей Константинович, доктор технических наук, окончил Ульяновский политехнический институт по специальности «Авиаприборостроение». Профессор и заведующий кафедрой «Измерительно-вычислительные комплексы» УлГТУ. Имеет монографии, статьи, патенты в области приборостроения [e-mail: ksk@ulstu.ru].

Аннотация

В статье показано, что для использования преимуществ архитектуры интегральной модульной авионики при построении комплексов бортового оборудования (КБО) нужно отказаться от распределения функций по их принадлежности к одной из функций уровня летательного аппарата (ЛА). Предложен метод построения и оптимизации функциональной структуры КБО ЛА на основе построения дерева функций изделия. Сформированы основные принципы построения групп функций, оптимизированных для реализации на аппаратной платформе с заданными характеристиками. Введено понятие косвенной реализации функции. Описаны основные достоинства и недостатки косвенной реализации функции. Предложен и описан алгоритм оптимизации дерева функций изделия. Описаны источники данных, необходимые для оптимизации дерева функций изделия. На примере формирования одной группы функций представлен пошаговый алгоритм действий. Предложен метод повышения уровня нагрузки на аппаратную единицу при ее недостаточной загруженности после процесса формирования группы функций.

Ключевые слова: комплекс бортового оборудования, архитектура, оптимизация, алгоритм, дерево функций изделия, безопасность, интегральная модульная авионика.

OPTIMIZATION OF THE FUNCTIONAL STRUCTURE OF AIRBORNE HARDWARE COMPLEXES

Dmitrii Valerevich Khakimov, graduated from the Faculty of Information Systems and Technologies of Ulyanovsk State Technical University; Postgraduate Student of the Department of Measuring and Computing Systems of Ulyanovsk State Technical University; Engineer of the Complex Department of Scientific-Production Enterprise "Digital Radio Systems"; an author of articles in the field of avionics safety assessment and airborne hardware complexes structure optimization. e-mail: sense151015@mail.ru.

Sergei Konstantinovich Kiselev, Doctor of Engineering; graduated from Ulyanovsk Polytechnic Institute with a specialty in Aircraft Instruments Engineering; Professor and Head of the Department of Measuring and Computing Systems of Ulyanovsk State Technical University; an author of monographs, articles, and patents in the field of instrument engineering. e-mail: ksk@ulstu.ru.

Abstract

The article shows that it is unnecessary to distribute functions on the basis of their belongings to one of the air vehicle (AV) level in order to take advantages of the integrated modular avionics (IMA) architecture in constructing the airborne hardware complexes (AHC). The method of construction and optimization of the functional structure of AV AHC on the basis of constructing a product functions tree is considered. The basic principles of constructing function groups optimized for implementation on a hardware platform with the desired characteristics are formulated. The authors developed a notion of indirect function realization and described its main advantages and disadvantages. Also, a product functions tree describing algorithm was proposed and outlined. The recursive action algorithm was given by the example of forming one group of functions. The method for improving the load on a hardware unit with its lack of load after the process of forming a group of functions was proposed.

Key words: airborne hardware complex, architecture, optimization, algorithm, product functions tree, security, integrated modular avionics.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время архитектура интегральной модульной авионики (ИМА) считается наиболее перспективной технологией, которая имеет большое количество преимуществ перед федеративной архитектурой авионики. Разработчики уже проектируют единичные блоки и системы для вновь разрабатываемых комплексов бортового оборудования (КБО) летательных аппаратов (ЛА), которые заменяют аналогичные используемые серийные изделия. Производители КБО создали ряд проектов на основе архитектуры аппаратно-интегрированной модульной авионики (АИМА) [1].

Для применения архитектуры ИМА в масштабах всего КБО нужно отказаться от использования принципа распределения функций по их принадлежности к одной из функций уровня ЛА.

Для построения функциональной структуры КБО можно использовать метод, основанный на построении и оптимизации дерева функций изделия (ДФИ).

Процесс оптимизации ДФИ КБО состоит из трех этапов:

- обнаружение и минимизация количества повторяющихся функций в составе ДФИ;
- поиск функций, которые могут быть реализованы косвенным методом;
- формирование и оптимизация групп функций под выбранную архитектуру КБО.

В рамках данной статьи рассматриваются второй и третий этапы оптимизации ДФИ КБО ЛА.

ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ГРУПП ФУНКЦИЙ

В современных КБО, имеющих федеративную архитектуру, по функциональному назначению выделяют:

- системы связи;
- системы навигации;
- системы индикации;
- системы управления полетом;
- системы предупреждения столкновений;
- системы метеонаблюдения;
- системы управления самолётом;
- системы регистрации параметров полета.

При проектировании КБО на основе архитектуры ИМА подобная классификация типов систем применяться не может, так как архитектура ИМА не предполагает наличия систем.

Для классификации структуры оборудования КБО на основе ИМА по функциональному назначению можно выделить:

- измерительное оборудование;
- вычислительное оборудование;
- оборудование индикации и отображения информации;
- оборудование специального назначения.

К оборудованию специального назначения, например, можно отнести: электронно-оптические системы наблю-

дения, системы поиска и обнаружения целей, системы управления вооружением и др.

Главным отличием ИМА является наличие единой аппаратно-вычислительной платформы. Этот факт обуславливает изменение конструкции всех остальных типов оборудования в составе КБО с целью сопряжения с вычислительной платформой.

Вычислительная платформа ИМА представляет из себя крейтовую структуру. Крейт укомплектовывается модулями различного назначения, объединенными между собой высокоскоростной средой передачи данных. Характеристики полученной в итоге вычислительной платформы главным образом зависят от характеристик модулей и логики их взаимодействия.

Единая вычислительная платформа позволяет реализовать КБО не как набор систем, а как multifunctional структуру. Это свойство является главной отличительной особенностью архитектуры ИМА, ее преимуществом над всеми предыдущими поколениями КБО.

Multifunctionality and unified computational platform allow to implement the mechanism of dynamic redistribution of functions between modules – reconfiguration of KBO. This mechanism is an extremely effective method of increasing functional reliability of KBO and level of safety of aircraft operation. Such a mechanism is used when the equipment fails.

The purpose of building and optimizing DFI is the development of functional structure of KBO for work in the normal mode of operation of the computational platform.

Each module of the computational platform has limited computational capabilities, because of which for maintaining the optimal mode of KBO operation, the load on each of the modules must be optimized. For this, it is necessary to fix to the module a set of performed functions.

Set of functions, fixed to the module in the normal mode of operation, we call a group of functions (GF).

For effective use of computational resources of the module, the following requirements should be met:

- the number of input data should be minimal;
- the number of repetitions of identical functions should be minimal;
- within one module, it should not be possible to realize more than one channel of a reserved function;
- modules should be maximally equally loaded;
- when building GF, levels of project guarantees should be taken into account.

Reduction of the number of input data leads to localization of computational processes within one module. Execution of processes within one module allows to achieve minimal execution time of the computational

го цикла функции, так как передача данных даже по высокоскоростным интерфейсам вносит ряд задержек. Также следствием соблюдения данного принципа является снижение нагрузки на межмодульные интерфейсы обмена данными.

Достижение минимального количества повторений одних и тех же функций возможно благодаря качеству выполнения первого процесса оптимизации ДФИ и реализации функций косвенным методом.

Косвенная реализация функции – это метод реализации функции, при котором ряд входных параметров и ряд данных от вычисляемых подфункций полностью либо частично заменяются аналогичными данными, ранее вычисленными на данном модуле. Такая реализация функций позволяет максимально сократить объем входных данных и снизить суммарную вычислительную нагрузку на платформу, максимально эффективно нагрузив модули.

В рамках одного модуля не может быть реализован более чем один канал резервированной функции, так как при этом будет нарушен принцип независимости резервирующих функций.

Формирование ГФ из функций одного уровня отказо-безопасности позволяет провести градацию аппаратных единиц (АЕ). Проектирование модулей с более высоким уровнем гарантии проектирования (УГП) приводит к значительному повышению себестоимости модуля. Причиной этому являются использование более дорогой элементной базы, применение различных конструктивных и схемотехнических методов повышения надежности. Исходя из данного факта, введем деление модулей по УГП. В соответствии с [2, 3] есть пять типов модулей с УГП от «А» до «Е». При формировании ГФ будем учитывать УГП функций с целью максимального сосредоточения функций с одинаковым УГП в рамках модуля с соответствующим УГП.

Поиск функций, реализуемых косвенным методом

Формирование ГФ начинается с выбора базовой функции. После чего подбирается вторая и последующие функции. Набор данных, требуемых для выполнения закрепленных за модулем функций, формирует множество требуемых входных параметров для обеспечения работы модуля: $GFn \{g_1, \dots, g_b\}$, где n – номер ГФ, g – это входной параметр, $b \in N$.

Функции, реализуемые косвенным методом, в хронологическом порядке выполняются после базовых функций. Следовательно, с точки зрения функции, выполняющейся косвенным методом, выходные параметры базовых функций могут быть рассмотрены как входные. Поэтому в процессе формирования ГФ, в состав множества $GFn \{g_1, \dots, g_b\}$ вносятся не только входные параметры, требуемые для реализации вновь добавляемой в состав ГФ функции, но и выходные параметры данной функции.

Таким образом, в процессе формирования ГФ образуется иерархическая структура функций, закрепленных за модулем.

Стоит обратить внимание на то, что методом косвенной реализации недопустимо выполнять функции, кото-

рые требуют высокой точности и скорости исполнения. Это связано с тем, что данные, полученные путем математических вычислений, часто округляются и являются менее точными, чем данные, полученные от измерительной аппаратуры. Тот факт, что функции, реализованные косвенно, по времени выполняются после базовых функций, необходимых для их исполнения, приводит к появлению временной задержки.

Разработчик изделия должен тщательно оценить для всех функций возможность реализации косвенным методом.

ФОРМИРОВАНИЕ ГФ

Как было сказано ранее, формирование ГФ начинается с выбора базовой функции. Сначала определим, какие параметры характеризуют функции, какие параметры характеризуют вычислительную платформу КБО и ее модули. Определим, по каким параметрам будет производиться выбор функций.

Функция является алгоритмическим объектом, для реализации которого, с точки зрения вычислительной техники, требуется наличие определенной входной информации и некоторого объема вычислительных ресурсов.

Оценка вычислительных ресурсов процессорной техники является сложной задачей, требующей комплексного подхода. Для решения данной задачи существует ряд методов. В последнее время повсеместное распространение получил метод замера производительности исследуемого объекта относительно эталонного. Для проведения процесса оценки вычислительных ресурсов корпорацией SPEC (Standard Performance Evaluation Corporation) [4] разработан ряд тестов и методик. В рамках статьи использование этих методов и тестов нецелесообразно, в связи с чем будет использоваться условный коэффициент.

Коэффициент вычислительных ресурсов (КВР) отображается в виде целого числа от 1 до 10, где 10 – максимальный объем вычислительных ресурсов [5, 6]. Для оценки требуемых для реализации функции КБО объемов вычислительных ресурсов применим аналогичный коэффициент.

Проведем отсеивание функций КБО, которые не являются вычислительными либо по иным причинам не рассматриваются в процессе оптимизации. Сформируем множество $F_1 \{f_1, \dots, f_a\}$, куда включим все подходящие для дальнейшего процесса оптимизации функции.

Задачу формирования ГФ с точки зрения комбинаторики можно позиционировать как задачу о заполнении рюкзака [7]. Каждый модуль в составе вычислительной платформы является «рюкзаком», а функции КБО – это «вещи», которые нужно поместить в рюкзак. Параметр вместимости рюкзака – это КВР модуля. Это классическая постановка задачи о рюкзаке. Однако решение данной задачи известными алгоритмами не даст требуемого результата, так как параллельно должна решаться вторая задача – минимизация количества входных параметров ГФ.

Таким образом, для достижения требуемого результата нужно решить задачу двухкритериальной оптимизации ГФ.

Пусть требуется провести формирование ГФ для модулей с КВР = 10. При этом нам известны следующие исходные данные:

- $F_0 \{f_1, \dots, f_i\}$ – множество функций комплекса, подлежащих рассмотрению;
- $IF_i \{d_1, \dots, d_n\}$ – множество входных данных для каждой функции;
- $OF_i \{d_1, \dots, d_n\}$ – множество выходных данных для каждой функции;
- $M_{эф} \{d_1, \dots, d_i\}$ – множество данных ГФ;
- $M_{б.вх.} \{d_1, \dots, d_i\}$ – множество входных данных базовых функций;
- $M_{б.вых.} \{d_1, \dots, d_i\}$ – множество выходных данных базовых функций;
- $M_{к.вых.} \{d_1, \dots, d_i\}$ – множество выходных данных косвенно реализованных функций;
- $GF_j \{f_1, \dots, f_i\}$ – множество функций, входящих в состав ГФ.

Множества $M_{эф}$, $M_{б.вх.}$, $M_{б.вых.}$, $M_{к.вых.}$ являются множествами, характеризующими ГФ, они связаны по формуле (1):

$$M_{эф} = M_{б.вх.} + M_{б.вых.} + M_{к.вых.} \quad (1)$$

Связь множеств $M_{б.вх.}$, $M_{б.вых.}$, $M_{к.вых.}$ с функциями из состава ГФ определяется следующими формулами:

$$M_{б.вх.} = \sum_{i=1}^n IF_i, \quad (2)$$

$$M_{б.вых.} = \sum_{i=1}^n OF_i, \quad (3)$$

где IF_i и OF_i принадлежат базовым функциям ГФ,

$$M_{к.вых.} = \sum_{i=1}^n OF_i, \quad (4)$$

где OF_i принадлежит косвенно реализованным функциям ГФ.

Шаг 1: Выбрать первую базовую функцию ГФ.

Базовая функция определяется методом поиска функции с наибольшим количеством входных данных. То есть требуется найти такую функцию f_i из множества F_0 , у которой множество IF_i будет иметь наибольшее количество элементов.

Задача поиска множества максимальной размерности является типичной и может быть решена любым из общеизвестных алгоритмов поиска [7].

После того как первая базовая функция выбрана, обновляем множества, характеризующие ГФ:

$$M_{б.вх.} = M_{б.вх.} + IF_i, \quad (5)$$

где i – номер базовой функции в составе множества F_0 .

Шаг 2: Найти косвенно реализуемые функции.

Для этого необходимо вычислить $M_{эф}$ по формуле (1), после чего действовать по алгоритму, представленному на рисунке 1.

Результатом работы представленного алгоритма будет ГФ, в которую войдут все косвенно реализуемые функции на множестве параметров $M_{эф}$.

Стоит обратить внимание на то, что косвенно реализуемые функции, найденные по данному алгоритму, после первого пересчета $M_{эф}$ будут реализовываться не только на параметрах $M_{б.вх.}$ и $M_{б.вых.}$, но и на $M_{к.вых.}$.

Шаг 3: Выбрать базовую функцию ГФ.

Выбор второй и последующих базовых функций определяется критерием минимального количества входных данных, требующихся модулю для работы. Данный критерий является основой для отказа от методов полного перебора при поиске вариантов формирования структуры ГФ и позволяет использовать метод ветвей и границ.

Граничным условием при составлении вариантов структуры ГФ является ограничение по выбору базовых функций в соответствии со следующими принципами:

1. Если при поиске базовой функции есть несколько равнозначных вариантов, тогда должен быть рассмотрен каждый из них;

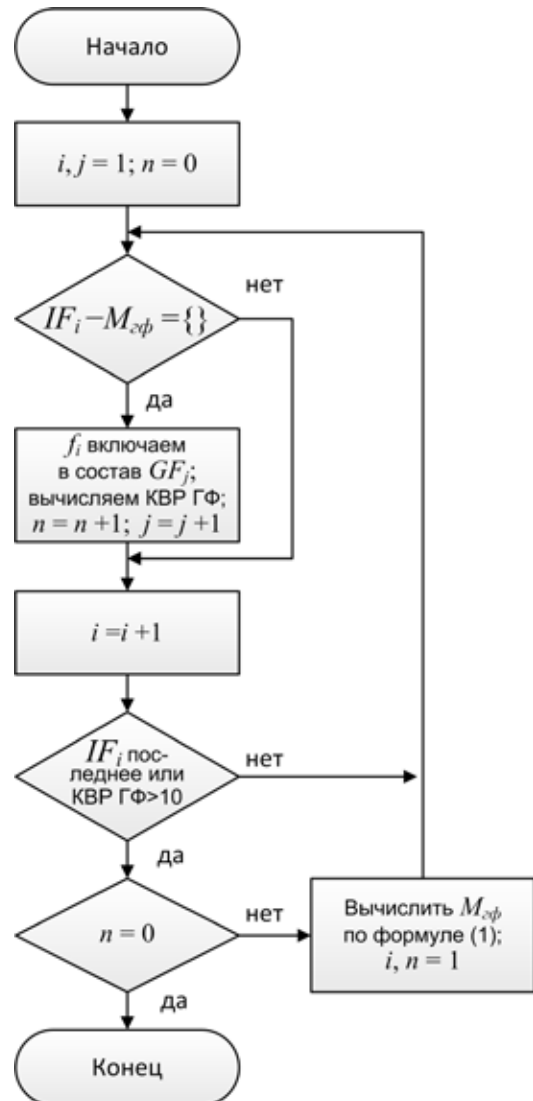


Рис. 1. Алгоритм поиска косвенно реализуемых функций

2. Если при выборе базовых функций имеется только одна оптимальная комбинация, тогда количество вариантов структуры ГФ зависит только от косвенно реализуемых функций;

3. Если при выборе базовых функций имеется один приоритетный вариант и несколько менее приоритетных (требуется добавление ряда входных данных для реализации), тогда требуется рассмотреть те из них, для реализации которых требуется незначительное расширение множества входных данных.

Степень незначительности расширения множества $M_{б.вх}$ в пункте 3 обозначим как параметр S – выражается натуральным числом, отображающим количество элементов, на которое допускается расширить множество $M_{б.вх}$ при выборе очередной базовой функции. S должно быть определено разработчиком заранее.

Алгоритм поиска очередной базовой функции представлен на рисунке 2. Итогом работы алгоритма является отсортированный по приоритету список функций кандидатов в базовые функции ГФ. Каждая функция – кандидат является основой для построения варианта структуры ГФ.

Дальнейший процесс построения ГФ состоит в циклическом выполнении шагов 2 и 3.

Итогом процесса построения ГФ является набор деревьев структуры ГФ, далее по тексту просто деревья ГФ. Пример такого дерева приведен на рисунке 3, где функции f_1 и f_2 являются базовыми, а f_3, f_4, f_5 – косвенно реализуемыми.

После того как выполнение шагов 1, 2, 3 завершено, мы имеем набор деревьев для каждой из ГФ.

Шаг 4: Выбрать оптимальную структуру каждой из ГФ.

Выбор оптимальной структуры каждой из ГФ требует комплексного анализа всех ГФ на уровне вычислительной платформы. Применим метод полного перебора возможных комбинаций распределения функций по модулям. Процесс заключается в переборе сочетаний деревьев ГФ с соблюдением условий их совместимости. Деревья ГФ являются совместимыми, если не нарушается принцип однократного включения каждой функции комплекса в ГФ. Если, в качестве примера, выбрать дерево ГФ, представленное на рисунке 3, то все варианты деревьев других ГФ, где задействованы функции f_1, f_2, f_3, f_4, f_5 , отсеиваются.

Использование метода полного перебора в данном случае не приводит к экспоненциальному увеличению количества комбинаций с увеличением количества рассматриваемых объектов, так как наличие условий сочетаемости деревьев ГФ многократно снижает количество возможных комбинаций.

Для выбора оптимальной структуры ДФИ КБО проведем сортировку полученных вариантов функциональной структуры по следующим критериям:

1. Суммарный КВР всей функциональной структуры;
2. Количество требуемых модулей для реализации функциональной структуры;
3. Загруженность интерфейса межмодульного обмена;
4. Уровень отказобезопасности КБО.

Сравнивая данные параметры структур КБО, разработчик выбирает оптимальный вариант. Для придания баланса приоритетов между критериями используются весовые коэффициенты. Величины весовых коэффициентов регулируются разработчиком по согласованию с заказчиком изделия.

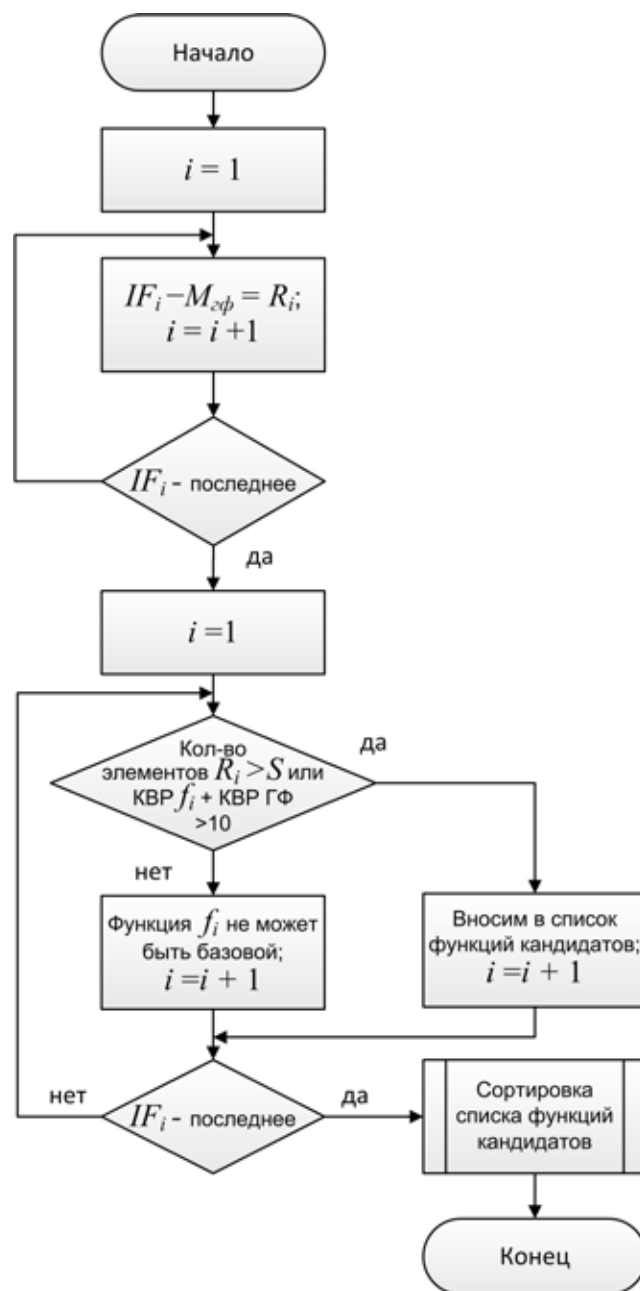


Рис. 2. Алгоритм поиска базовых функций

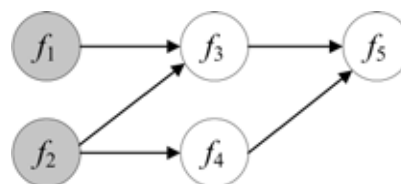


Рис. 3. Дерево структуры ГФ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод построения и оптимизации ДФИ КБО нацелен на получение оптимальной функциональной структуры КБО, построенного на основе архитектуры ИМА. Итогом работы алгоритма является функциональная структура КБО, оптимизированная под работу оборудования в штатном режиме. Такая структура призвана обеспечить максимально эффективную загрузку каждого из модулей, входящих в состав вычислительной платформы.

Применение данного метода на ранних стадиях проектирования позволит разработчику более тщательно проработать структуру КБО. Результатом более эффективного процесса проектирования изделия на ранних стадиях проектирования, как правило, является снижение количества итерационных процессов, направленных на доработку и исправление ошибок.

Таким образом, можно прогнозировать наличие качественных и экономических эффектов в результате внедрения процесса оптимизации ДФИ КБО ЛА в процесс проектирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кучерявый А.А. Современная интегральная модульная авионика: состояние и тенденции развития : Аналитический обзор. – Ульяновск : ОАО «УКБП», 2006. – 105 с.
2. ВС ГА-Р4761. Руководство по методам оценки безопасности систем и бортового оборудования воздушных судов гражданской авиации. – Введ. 2011–01–01. – М. : ОАО «Авиаиздат», 2011. – 265 с.
3. ВС ГА-Р4754. Руководство по процессам сертификации высокоинтегрированных сложных бортовых систем воздушных судов гражданской авиации. – Введ. 2011–01–01. – М.: ОАО «Авиаиздат», 2010. – 76 с.
4. Standard Performance Evaluation Corporation. URL: <https://www.spec.org> (дата обращения: 17.04.2016).
5. Дегтярев А.Р., Медведев Г.В. Алгоритм распределения задач в многопроцессорных комплексах интегрированной модульной авионики // Автоматизация процессов управления. – 2014. – № 1 (35). – С. 79–84.
6. Шеиброт И.М., Алиев В.М. Проектирование вычислительных систем распределенных АСУ ТП. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 88 с.
7. Виленкин Н.Я. Комбинаторика. – М. : Наука, 1969. – 328 с.

REFERENCES

1. Kucheriavyi A.A. *Sovremennaiia integralnaia modulnaia avionika: sostoianie i tendentsii razvitiia: Analiticheskii obzor* [Modern Integrated Modular Avionics. States and Progress Trends. Analytical Review]. Ulyanovsk. UIMDB OJSC Publ., 2006. 105 p.
2. VS GA-R4761. *Rukovodstvo po metodam otsenki bezopasnosti sistem i bortovogo oborudovaniia vozdushnykh sudov grazhdanskoi aviatsii. Vved. 2011–01–01* [Recommended Practices on Methods for Safety Assessment for Civil Airborne Systems and Equipment]. Moscow, Aviaizdat OJSC Publ., 2011. 265 p.
3. VS GA-R4754. *Rukovodstvo po protsessam sertifikatsii vysokointegrirovannykh slozhnykh bortovykh sistem vozdushnykh sudov grazhdanskoi aviatsii. Vved. 2011–01–01* [Recommended Practices on Certification Processes for Highly Integrated Complex Civil Airborne Systems]. Moscow, Aviaizdat OJSC Publ., 2010. 76 p.
4. Standard Performance Evaluation Corporation. Available at: <https://www.spec.org> (accessed 17.04.2016).
5. Degtiarev A.R., Medvedev G.V. *Algoritm raspredeleniia zadach v mnogoprotsessornykh kompleksakh integrirrovannoi modulnoi avioniki* [Task Distribution Algorithm for Multiprocessor of Integrated Modular Avionics]. *Avtomatizatsiia protsessov upravleniia* [Automation of Control Processes], 2014, no.1 (35), pp. 79–84.
6. Sheibrot I.M., Aliev V.M. *Proektirovanie vychislitelnykh sistem raspredelennykh ASU TP* [Computer Systems Design of Distributed Computer-Aided Process Control System]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. 88 p.
7. Vilenkin N.Ya. *Kombinatorika* [Combinatorial Analysis]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 328 p.