

НИЗКОУРОВНЕВОЕ РЕЗЕРВИРОВАНИЕ АППАРАТНЫХ АРХИТЕКТУР В РЕКОНФИГУРИРУЕМОЙ СИСТЕМЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ БОРТОВОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Л.В. Савкин¹, В.М. Новичков², А.Е. Ширшаков¹

¹НПО им. С.А. Лавочкина, Химки, Московская обл., Российская Федерация
e-mail: android4.1@mail.ru; shirshakov@laspace.ru

²МАИ (НИУ), Москва, Российская Федерация
e-mail: v13217@ya.ru

Рассмотрена процедура низкоуровневого резервирования базовых аппаратных архитектур ранее предложенной реконфигурируемой системы функционального контроля и диагностики бортового комплекса управления космического аппарата. Данную процедуру предложено использовать в составе единого реконфигурируемого вычислительного поля для повышения надежности системы контроля и диагностики, не прибегая к использованию внешних дополнительных аппаратных средств. В случаях использования процедур мажоритарного резервирования мажоритарные органы также предложено аппаратным образом реализовывать на базе выделенных фрагментов реконфигурируемого вычислительного поля. Представлены два варианта локализации базовых аппаратных архитектур функциональных областей и соответствующих им мажоритарных органов в составе единого реконфигурируемого вычислительного поля системы контроля и диагностики. Получено выражение для расчета вероятности безотказной работы аппаратных архитектур функциональных областей, реализуемых по схеме тройного мажоритарного резервирования.

Ключевые слова: бортовой комплекс управления, мажоритарное резервирование, реконфигурируемое вычислительное поле.

LOW LEVEL RESERVATION OF THE HARDWARE ARCHITECTURE OF RECONFIGURABLE COMPLEX FUNCTIONAL MONITORING AND DIAGNOSTICS SYSTEM OF THE ONBOARD SPACECRAFT CONTROL

L.V. Savkin¹, V.M. Novichkov², A.E. Shirshakov¹

¹Lavochkin Association, Khimki, Moscow Region, Russian Federation
e-mail: android4.1@mail.ru; shirshakov@laspace.ru

²Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation
e-mail: v13217@ya.ru

In this article we examine the procedure of low level reservation of the basic hardware architecture of the earlier offered reconfigurable complex functional monitoring and diagnostics system of the onboard spacecraft control. We offer to use this procedure as a part of a uniform reconfigurable computing field for reliability improvement of the monitoring and diagnostics system without resorting to use of external additional hardware. In case of using the majority reservation procedures, it is also offered to

realize majority organs by means of hardware method on the basis of selected fragments of the reconfigurable computing field. Consequently, we deal with two options of localization of the basic hardware architecture of the functional areas and the majority organs corresponding to them, as a part of a uniform reconfigurable computing field in monitoring and diagnostics system. As a result, we obtain an expression for calculating the probability of trouble-free operation of the hardware architecture of functional areas realized according to the triple majority reservation diagram.

Keywords: onboard control complex, majority reservation, reconfigurable computing field.

Ключевым достоинством большинства известных концепций реконфигурируемых вычислительных систем (РВС) является возможность прямой аппаратной адаптации реконфигурируемого вычислительного поля (РВП), реализующего всю совокупность требуемых функций, под информационную структуру решаемых задач [1]. Данный факт обуславливается, прежде всего, высокой гибкостью всех алгоритмов, выполняемых в составе РВП на низком аппаратном уровне [1–3].

Использование РВС в контрольно-диагностическом обеспечении бортовых систем (БС) КА позволяет:

- кардинальным образом перестраивать диагностические модели БС КА и формировать алгоритмы многоуровневого [4] контроля и диагностики БС, которые не были предусмотрены штатными программными СКД;

- осуществлять методы диагностики и контроля высокоинтегрированных подсистем бортовых комплексов управления (БКУ), которые могут потребовать введения дополнительных аппаратных инструментов (архитектур);

- осуществлять аппаратный синтез различных классов контрольно-диагностических алгоритмов (логических, вероятностных и т.п.) непосредственно в РВП;

- восстанавливать отказавшие контролируемые каналы управления и обработки информации путем их “перенесения” в область РВП.

В работах [5, 6] приведен один из возможных вариантов распределения вычислительных ресурсов единого РВП для решения задач бортового диагностирования КА, включающих в себя обработку диагностической информации БС, формирование диагностических тестов и аппаратное построение в РВП дискретных цифровых устройств БКУ КА для диагностики методом эквивалентного дублирования аппаратуры. За основу аппаратной архитектуры диагностируемой БКУ была взята структурная схема БКУ с четырехгранной бортовой вычислительной системой “Марс-4”, разрабатываемой в МОКБ “Марс” [7].

Структурная схема реконфигурируемой системы функционального контроля и диагностики (СФКД) БКУ КА предложена в [8] (рис. 1).

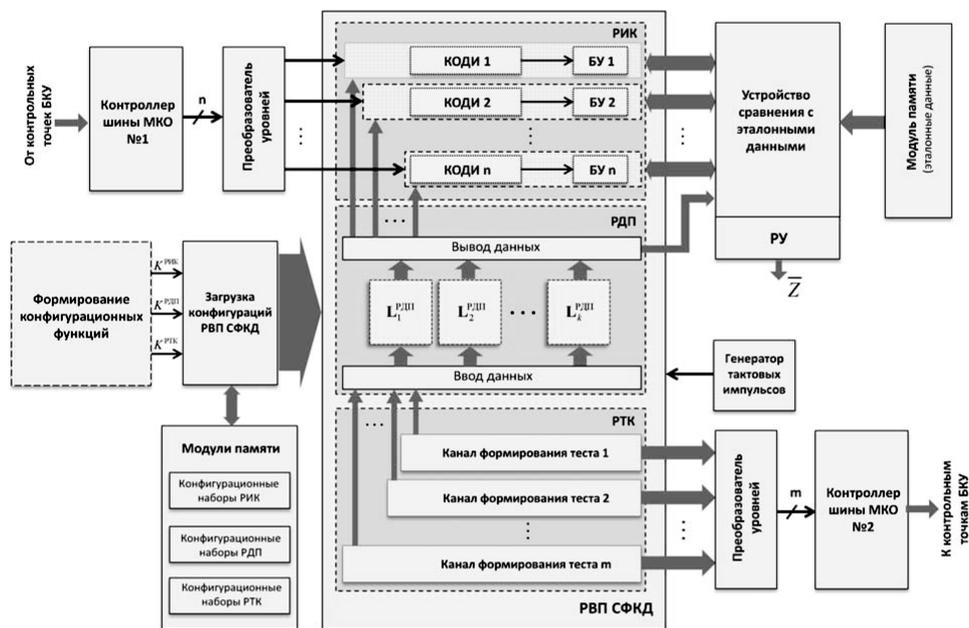


Рис. 1. Структурная схема реконфигурируемой СФКД БКУ КА

Система функционального контроля и диагностики помимо единого РВП содержала в своем составе два независимых контроллера шины мультиплексного канала обмена (МКО), два преобразователя уровней, согласующих уровни логических напряжений между ПЛИС и контроллерами шины МКО, модули конфигурационной памяти, генератор тактовых импульсов, внешний загрузчик конфигураций РВП, устройство сравнения с эталонными данными, решающее устройство (РУ) и модуль постоянной памяти, осуществляющий хранение эталонных данных в виде сигнатур.

Единое РВП СФКД было разделено на три функциональных области: область реконфигурируемых измерительных каналов (РИК), область реконфигурируемого дублирующего поля (РДП) и область реконфигурируемых тестовых каналов (РТК).

В области РИК было предложено реализовать n независимых диагностических каналов, каждый из которых состоял из собственного канала обработки диагностической информации (КОДИ) и согласующего буферного устройства (БУ), данные от которого поступали во внешнее (относительно РВП) устройство сравнения с эталонными данными. Посредством КОДИ осуществлялась основная обработка диагностической информации, поступающей от БКУ КА по шине мультиплексного канала обмена через контроллер шины МКО № 1. Одним из алгоритмов обработки диагностической информации, реализуемых посредством КОДИ, является формирование значений регистрируемых сигнатур. Сигнатуры, в свою очередь, формируются

на основе цифровых данных, поступающих от постоянного набора контрольных точек, предусмотренного схемой встроенного контроля БКУ. Результатом сопоставления регистрируемых и эталонных сигнатур является сформированный в РУ вектор технического состояния БКУ \bar{Z} .

Область РДП реализует диагностику дискретных цифровых устройств и подсистем БКУ КА методом эквивалентного дублирования аппаратуры. Это достигается путем создания требуемой эталонной архитектуры цифрового устройства в одной из выделенных матриц конфигурируемых логических блоков (КЛБ) дублирующего поля $L_d^{\text{РДП}}$, где $d = \bar{1}, k$ — условный порядковый номер матричного набора КЛБ в РДП.

Область РТК представляет собой многоканальный реконфигурируемый формирователь функциональных и параметрических тестов БКУ КА, каждый из которых реализуется аппаратным образом в одном из m каналов формирования тестов. Архитектура РТК в процессе идентификации технического состояния БКУ КА (или по целеуказаниям с наземного комплекса правления) может перестраиваться. Выдачу тестов в постоянный набор контрольных точек БКУ было предложено осуществлять через независимый контроллер шины МКО № 2.

Цель настоящей статьи — указать на то, что для повышения живучести, отказоустойчивости и надежности реконфигурируемой СФКД в целом вполне возможно использовать мажоритарное резервирование (дублирование, троирование и т.п.) всех базовых архитектур СФКД непосредственно в РВП. Понятно также, что возможность проведения процедур подобного рода ввиду ограниченности общего вычислительного ресурса РВП должна быть предусмотрена еще на начальных этапах проектирования СФКД БКУ КА. Более того, если мы будем рассматривать низкоуровневое мажоритарное резервирование базовых архитектур СФКД, то вполне естественным образом возникнет вопрос о локализации мажоритарных органов (МО) в РВП СФКД, не говоря уже о способах их реализации. Наиболее предпочтительным будет тот вариант, когда и МО также будут реализованы в составе единого РВП СФКД.

При практической реализации низкоуровневого мажоритарного резервирования базовых архитектур реконфигурируемой СФКД можно рассмотреть два возможных варианта их локализации (конфигурации) в составе единого РВП (рис. 2).

В первом случае базовые архитектуры каждой резервируемой СФКД будут сгруппированы в независимые фрагменты РВП, каждый из которых будет содержать области РИК, РДП и РТК: СФКД1, СФКД2, ..., СФКД h (рис. 2, а).

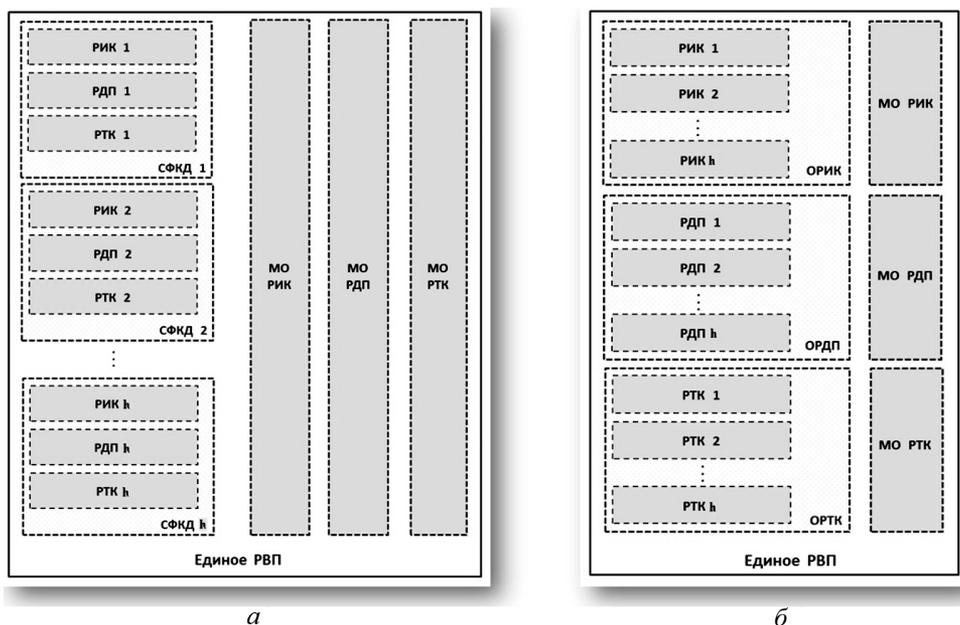


Рис. 2. Варианты локализации базовых архитектур СФКД при реализации мажоритарных органов в составе единого РВП

Во втором случае будет иметь место группировка в отдельные фрагменты РВП основных функциональных областей СФКД: общую область РИК (ОРИК), общую область РДП (ОРДП) и общую область РТК (ОРТК) (рис. 2, б). Ввиду разнородного характера информации, обрабатываемой и формируемой в каждой отдельно взятой функциональной области (РИК, РДП и РТК), вполне очевидно, что архитектуры МО будут трех типов: МО РИК, МО РДП и МО РТК. Из рис. 2 также следует, что под каждый тип МО должен выделяться собственный фрагмент РВП СФКД.

Архитектуру любого выделенного фрагмента РВП можно описывать конфигурационной функцией вида

$$K_i^{\text{РВП}} = F(\mathbf{L}_i, G(\mathbf{L}_i)), \quad (1)$$

где $K_i^{\text{РВП}}$ — выделенный фрагмент РВП СФКД, отведенный для реализации на нем i -й аппаратной архитектуры ($i = \overline{1, N}$ — условный порядковый (сквозной) номер аппаратной архитектуры в РВП СФКД); \mathbf{L}_i — матричный набор базовых логико-арифметических операций, реализуемых посредством КЛБ в i -й аппаратной архитектуре (фрагменте РВП); $G(\mathbf{L}_i)$ — орграф, описывающий топологию направленных логико-арифметических связей между элементами матрицы КЛБ \mathbf{L}_i выделенного фрагмента РВП.

Общую архитектуру РВП, учитывающую локализацию базовых архитектур СФКД для случая, изображенного на рис. 2, а, можно условно

записать в виде выражения

$$K^{\text{РВП}} = K^{\text{СФКД1}} \cup K^{\text{СФКД2}} \cup \dots \\ \dots \cup K^{\text{СФКД}h} \cup K^{\text{МОРИК}} \cup K^{\text{МОРДП}} \cup K^{\text{МОРТК}},$$

где $K^{\text{СФКД1}}, K^{\text{СФКД2}}, \dots, K^{\text{СФКД}h}$ — конфигурационные функции, описывающие особенности аппаратных архитектур, советующих фрагментам РВП СФКД1, СФКД2, ..., СФКДh; $K^{\text{МОРИК}}$ — конфигурационная функция, описывающая архитектуру фрагмента МО РИК; $K^{\text{МОРДП}}$ — конфигурационная функция, описывающая архитектуру фрагмента МО РДП; $K^{\text{МОРТК}}$ — конфигурационная функция, описывающая архитектуру фрагмента МО РТК. При этом понятно, что

$$K^{\text{СФКД}r} = K^{\text{РИК}r} \cup K^{\text{РДП}r} \cup K^{\text{РТК}r}, \quad r = \overline{1, h}.$$

Для второго варианта (см. рис. 2, б) конфигурационная функция, описывающая общую аппаратную архитектуру РВП СФКД, примет вид

$$K^{\text{РВП}} = K^{\text{ОРИК}} \cup K^{\text{ОРДП}} \cup K^{\text{ОРТК}} \cup K^{\text{МОРИК}} \cup K^{\text{МОРДП}} \cup K^{\text{МОРТК}},$$

причем

$$K^{\text{ОРИК}} = K^{\text{РИК}1} \cup K^{\text{РИК}2} \cup \dots \cup K^{\text{РИК}h},$$

$$K^{\text{ОРДП}} = K^{\text{РДП}1} \cup K^{\text{РДП}2} \cup \dots \cup K^{\text{РДП}h},$$

$$K^{\text{ОРТК}} = K^{\text{РТК}1} \cup K^{\text{РТК}2} \cup \dots \cup K^{\text{РТК}h},$$

где $K^{\text{ОРИК}}, K^{\text{ОРДП}}$ и $K^{\text{ОРТК}}$ — конфигурационные функции, описывающие архитектуры общих функциональных областей ОРИК, ОРДП и ОРТК.

Для обоих вариантов, изображенных на рис. 2, в соответствии с [9], выражение вероятности безотказной работы функциональной области РИК можно рассчитать по формуле

$$P_{\text{РВП(РИК)}} = p_{\text{МО}} \sum_{i=0}^{\frac{h-1}{2}} C_h^i p^{h-i} (1-p)^i, \quad (2)$$

где $p_{\text{МО}}$ — вероятность безотказной работы аппаратной архитектуры мажоритарного органа РИК; p — вероятность безотказной работы резервируемой аппаратной архитектуры РИК; h — нечетное число.

Для случая тройного мажоритарного резервирования выражение (2) будет иметь вид

$$P_{\text{РВП(РИК)}} = p_{\text{МО}} (3p^2 - 2p^3). \quad (3)$$

С помощью выражения (3) могут быть рассчитаны вероятности безотказной работы и других аппаратных архитектур функциональных областей (РДП и РТК), резервируемых по принципу тройного мажоритарного резервирования непосредственно в РВП СФКД.

Говоря о различных вариантах конфигурации базовых аппаратных архитектур СФКД, интуитивно можно предположить, что в некоторых случаях удобно использовать зеркальное дублирование областей РИК, РДП и РТК в РВП (рис. 3).

Данный вариант может рассматриваться, когда в составе РВП не будет предусматриваться реализация архитектуры МО, а коммутация между левой и правой частями симметричных базовых архитектур будет осуществляться по командам от бортовой аппаратуры командно-измерительной системы [7] (в этом случае МО не требуется).

Архитектуру РВП, изображенную на рис. 3, формально можно описать конфигурационной функцией вида

$$K_{1,2}^{\text{РВП}} = F(\mathbf{L}_1^{\text{РВП}}, \mathbf{L}_2^{\text{РВП}}, G(\mathbf{L}_1^{\text{РВП}}), G(\mathbf{L}_2^{\text{РВП}})) = F(\overleftarrow{\mathbf{L}_1^{\text{РВП}} | \mathbf{L}_2^{\text{РВП}}}, G(\overleftarrow{\mathbf{L}_1^{\text{РВП}} | \mathbf{L}_2^{\text{РВП}})),$$

где $\mathbf{L}_1^{\text{РВП}}, \mathbf{L}_2^{\text{РВП}}$ – матричные наборы КЛБ зеркально продублированных в РВП базовых аппаратных архитектур СФКД; $G(\mathbf{L}_1^{\text{РВП}}), G(\mathbf{L}_2^{\text{РВП}})$ – ор-

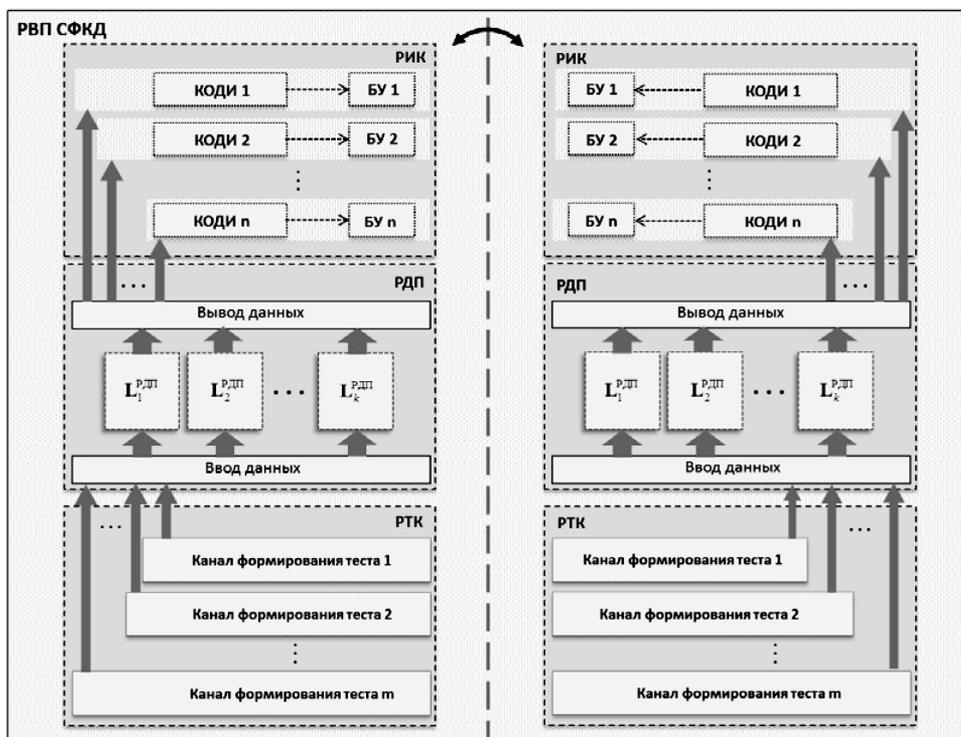


Рис. 3. Зеркальное дублирование базовых архитектур СФКД в РВП

графы, описывающие топологию направленных логико-арифметических связей между функциональными КЛБ-вершинами первого и второго зеркально дублируемых матричных наборов КЛБ; $\overleftarrow{\mathbf{L}_1^{\text{РВП}} | \mathbf{L}_2^{\text{РВП}}}$ — матричный набор базовых логико-арифметических операций с зеркальным отображением элементов матрицы $\mathbf{L}_1^{\text{РВП}}$ в элементы матрицы $\mathbf{L}_2^{\text{РВП}}$ (или наоборот).

Независимо от выбора того или иного вариантов резервирования базовых аппаратных архитектур СФКД в РВП, все они, безусловно, потребуют значительного увеличения вычислительных ресурсов единого РВП, которые должны будут учитываться на начальных этапах проектирования и разработки реконфигурируемой СФКД БКУ КА. Помимо резервируемых архитектур общий вычислительный ресурс РВП должен быть рассчитан еще и на реализацию МО функциональных областей РИК, РДП и РТК. Несмотря на это, главным достоинством рассмотренных процедур низкоуровневого мажоритарного резервирования базовых аппаратных архитектур СФКД является тот факт, что и функциональные области и отведенные под них МО могут быть полностью реализованы на базе однотипных КЛБ в составе выделенных фрагментов РВП без задействования внешних (относительно РВП) аппаратных средств.

Выводы. В целях повышения живучести, отказоустойчивости и надежности СФКД предложено использовать процедуры низкоуровневого резервирования базовых аппаратных архитектур СФКД непосредственно в РВП. В случаях мажоритарного резервирования архитектур СФКД МО также предложено реализовывать на базе выделенных фрагментов РВП.

Получено выражение для расчета вероятности безотказной работы функциональной области РИК для случая тройного мажоритарного резервирования. Данное выражение может быть использовано для расчета вероятности безотказной работы остальных функциональных областей СФКД: РДП и РТК.

Существенным недостатком предложенных процедур является необходимость задействования значительного дополнительного вычислительного ресурса РВП СФКД, достоинством — реализация функциональных областей и отведенных под них МО на базе однотипных КЛБ, образующих единое РВП СФКД.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Алексеев А.А., Кораблев Ю.А., Шестопалов М.Ю.* Идентификация и диагностика систем. М.: Академия, 2009. 352 с.
2. *Бортовые системы управления космическими аппаратами* / А.Г. Бровкин, Б.Г. Бурдыгов, С.В. Гордийко и др.; под ред. А.С. Сырова. М.: МАИ-ПРИНТ, 2010. 304 с.

3. *Ильдуду К.А.* Надежность, контроль и диагностика вычислительных машин и систем. М.: Высш. шк., 1989. 216 с.
4. *Каляев И.А., Левин И.И., Семерников Е.А., Шмойлов В.И.* Реконфигурируемые мультиконвейерные вычислительные структуры / под общ. ред. И.А. Каляева. Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2009. 344 с.
5. *Савкин Л.В.* О решении задач бортового диагностирования космических аппаратов с помощью реконфигурируемых вычислительных систем. Технические науки – от теории к практике: Сб. ст. по материалам XXXIX Междунар. науч.-практич. конф. Новосибирск: Изд-во СибАК, 2014. № 10 (35). С. 79–88.
6. *Савкин Л.В., Шириаков А.Е., Новичков В.М.* Построение реконфигурируемой системы функционального контроля и диагностики бортового комплекса управления космического аппарата // *Авиакосмическое приборостроение*. 2015. № 6. С. 8–13.
7. *Шириаков А.Е., Новичков В.М., Савкин Л.В., Макаров А.С.* Расширение функциональных возможностей системы контроля и диагностики бортового комплекса управления космического аппарата за счет встроенных реконфигурируемых вычислительных структур // *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*. 2015. № 2. С. 45–51.
8. *Gokhale M., Graham P.S.* Reconfigurable Computing-Accelerating Computation with Field-Programmable Gate Arrays. Springer Publ., 2005. 238 p.
9. *Hauck S.* Reconfigurable computing. The theory and practice of FPGA-based computation. Morgan Kaufmann Publ., 2007. 944 p.

REFERENCES

- [1] Alekseev A.A., Korablev Yu.A., Shestopalov M.Yu. Identifikatsiya i diagnostika sistem [Identification and diagnostics of systems]. Moscow, Academia Publ., 2009. 352 p.
- [2] Brovkin A.G., Burdygov B.G., Gordiyko S.V., et al. Ed. by Syrov A.S. Bortovye sistemy upravleniya kosmicheskimi apparatami [Onboard management systems of spacecrafts]. Moscow, MAI-PRINT Publ., 2010. 304 p.
- [3] Iydu K.A. Nadezhnost', kontrol' i diagnostika vychislitel'nykh mashin i sistem [Reliability, monitoring and diagnostics of computers and systems]. Moscow, Vyssh. shk. Publ., 1989. 216 p.
- [4] Kalyaev I.A., Levin I.I., Semernikov E.A., Shmoylov V.I., ed. by Kalyaev I.A. Rekonfiguriruemye mul'tikonveyernye vychislitel'nye struktury [Reconfigurable multipipeline computing structures]. Rostov-on-Don, YuNts RAN Publ., 2009. 344 p.
- [5] Savkin L.V. About the solution of tasks of onboard diagnosing of spacecrafts by means of reconfigurable computing systems. Technical science – from the theory to practice. *Sb. stat. po mat. XXXIX Mezhdunar. nauch.-praktich. konf.* [Proc. of mat. XXXIX internation. scien.-pract. conf.]. Novosibirsk, SIBAK Publ., 2014, no. 10 (35), pp. 79–88 (in Russ.).
- [6] Savkin L.V., Shirshakov A.E., Novichkov V.M. Creation of reconfigurable system functional monitoring and diagnostics of the spacecraft onboard control complex. *Aviacosmicheskoe priborostroenie* [Aerospace Instrument-Making], 2015, no. 6, pp. 8–13 (in Russ.).
- [7] Shirshakov A.E., Novichkov V.M., Savkin L.V., Makarov A.S. Enhancement of the functional capabilities of control and diagnostic system for SC onboard control system due to built-in reconfigurable computing structures. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2015, no. 2, pp. 45–51 (in Russ.).
- [8] Gokhale M., Graham P.S. Reconfigurable Computing-Accelerating Computation with Field-Programmable Gate Arrays. Springer Publ., 2005. 238 p.

[9] Hauck S. Reconfigurable computing. The theory and practice of FPGA-based computation. Morgan Kaufmann Publ., 2007. 944 p.

Статья поступила в редакцию 29.06.2015

Савкин Леонид Васильевич — аспирант, начальник бюро радиоэлектронной техники Научно-производственного объединения им. С.А. Лавочкина (Российская Федерация, Московская обл., 141400, Химки, Ленинградская ул., д. 24).

Savkin L.V. — post-graduate student, Chief of Radio-Electronic Technology Bureau, Lavochkin Association (Leningradskaya ul. 24, Khimki, Moscow Region, 141400 Russian Federation).

Новичков Вадим Михайлович — канд. техн. наук, доцент кафедры “Приборы и измерительно-вычислительные комплексы” Московского авиационного института (национального исследовательского университета) (Российская Федерация, 125993, Москва, Волоколамское ш., д. 4).

Novichkov V.M. — Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor of Instruments and Measuring Computer Systems Department, Moscow Aviation Institute (National Research University) (Volokolamskoye shosse 4, Moscow, 125993 Russian Federation).

Ширшаков Александр Евгеньевич — канд. техн. наук, заместитель генерального директора по электрическим системам Научно-производственного объединения им. С.А. Лавочкина (Российская Федерация, Московская обл., 141400, Химки, Ленинградская ул., д. 24).

Shirshakov A.E. — Cand. Sci. (Eng.), Deputy CEO on electrical systems of Lavochkin Association (Leningradskaya ul. 24, Khimki, Moscow Region, 141400 Russian Federation).

Пробьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Савкин Л.В., Новичков В.М., Ширшаков А.Е. Низкоуровневое резервирование аппаратных архитектур в реконфигурируемой системе функционального контроля и диагностики бортового комплекса управления космического аппарата // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2016. № 2. С. 18–27.

DOI: 10.18698/0236-3933-2016-2-18-27

Please cite this article in English as:

Savkin L.V., Novichkov V.M., Shirshakov A.E. Low level reservation of the hardware architecture of reconfigurable complex functional monitoring and diagnostics system of the onboard spacecraft control. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2016, no. 2, pp. 18–27. DOI: 10.18698/0236-3933-2016-2-18-27