

УДК 681.32

А.В. Греков¹, С.Ф. Тюрин^{2,3}¹Пермский военный институт войск национальной гвардии РФ, Пермь, Россия²Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия³Пермский государственный национальный исследовательский университет,
Пермь, Россия

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ РЕГУЛЯТОРОВ АВИАДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ИННОВАЦИОННЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Электронные регуляторы авиадвигателей (называемые также РЭД – регуляторы электронные двигателя) призваны обеспечить требуемую эффективность в текущих условиях, а также в условиях ухудшения параметров или при частичных отказах двигателя. В случае полного отказа двигателя остается надежда на второй или остальные двигатели (при их наличии). В ряде случаев возможен перезапуск отказавшего двигателя. Однако РЭД тоже подвержен отказам, поэтому в качестве резерва управления газотурбинным двигателем используется гидромеханическая система, позволяющая управлять двигателем почти «вручную». Этот дополнительный контур управления увеличивает массогабаритные показатели, затраты при производстве, эксплуатации и обслуживании двигателя. Анализ показывает, что большинство производителей ориентируются на переход к полностью электронной системе управления летательного аппарата, в том числе газотурбинным двигателем. Такой РЭД называется РЭДПО – регулятор электронный двигателя с полной ответственностью (или FADEC – Full Authority Digital Engine Control system). Однако для полного отказа от дублирующей автоматики необходим сверхнадежный РЭД. Существующие резервированные РЭД строятся с использованием резервирования также и цепей датчиков, исполнительных органов. Например, используют два канала РЭД. При этом выдаваемая ими информация сравнивается между собой, но только один канал является основным (командным) на данном запуске двигателя. При этом сами каналы также дублированы «внутри». Следовательно, фактически имеется 4 канала управления. В составе РЭД в настоящее время широко применяют программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС), например, типа FPGA (field-programmable gate array), микроконтроллеры, системы на кристалле. Предлагается повысить надежность РЭД с использованием инновационных логических элементов ПЛИС на основе как скользящего резервирования, так и резервирования на транзисторном уровне. В статье анализируются результаты оценки надежности таких элементов.

Ключевые слова: регулятор электронный двигателя, надежность, резервирование.

A.V. Grekov¹, S.F. Tyurin^{2,3}

¹Perm Military Institute of National Guard Troops, Perm, Russian Federation

²Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

³Perm State National Research University, Perm, Russian Federation

IMPROVE RELIABILITY OF ELECTRONIC AVIATION ENGINE CONTROLLER ON THE BASIS OF INNOVATIVE LOGIC ELEMENTS

Electronic regulators of aircraft engines (also called RED – electronic engine regulators) are designed to provide the required efficiency in current conditions, as well as in conditions of deterioration of parameters or with partial engine failures. In the event of a complete engine failure, there remains hope for a second or other engines (if any). In some cases, it is possible to restart the failed engine. However, the RED is also subject to failures, therefore, as a reservoir for managing the gas turbine engine, a hydromechanical system is used that allows the engine to be controlled almost "manually". This additional control loop increases the weight and dimensions, the costs of production, operation and maintenance of the engine. The analysis shows that the majority of manufacturers are guided by the transition to a fully electronic control system of the aircraft, including a gas turbine engine. Such a RED is called REDPO, an electronic motor controller with full responsibility (or FADEC - Full Authority Digital Engine Control system). However, in order to completely abandon duplicating automation, a super reliable RED is needed. Existing redundant REDs are built using the redundancy also of sensor circuits, actuators. For example, use two channels of RED. In this case, the information they provide is compared with each other, but only one channel is the main (command) information for this engine start. In this case, the channels themselves are also duplicated "inside". That is, there are actually 4 control channels. As a part of the RED, programmable logic integrated circuits (FPGAs), for example, type FPGA (field-programmable gate array), microcontrollers, systems on a chip are widely used. It is proposed to increase the reliability of the RED using innovative logic elements of FPGAs based on both sliding redundancy and redundancy at the transistor level. The article analyzes the results of evaluating the reliability of such elements.

Keywords: electronic engine controller, reliability, redundancy.

Введение. Электронное управление системами летательных аппаратов является одной из важнейших задач фирм-производителей [1–3]. Так, только за последние полтора года в РФ потеряно 10 космических аппаратов, значительная часть отказов произошла и по вине управляющей аппаратуры. Ещё свежи воспоминания о неудачах с космическим аппаратом «Фобос-грунт», ракетой «Протон» и др. Серьёзные проблемы имеются и в авионике, особенно в военной, в связи с импортозамещением электронной компонентной базы. Для управления и контроля работы авиационного газотурбинного двигателя используют системы трех видов: гидромеханическая, электронно-гидромеханическая и электронно-цифровая система управления двигателем, называемая РЭД – регулятор

электронный двигателя. В Российской Федерации проблематикой РЭД занимаются в АО «ОДК СТАР» (г. Пермь) [4–6]. Применение основной и дублирующей автоматики ведет к дополнительным затратам при производстве, эксплуатации и обслуживании двигателя. Большинство зарубежных фирм-производителей ориентируются на переход к полностью электронной системе управления всеми органами летательного аппарата, к системе управления «с полной ответственностью» (FADEC – Full Authority Digital Engine Control system) [4–6], что предполагает также и обеспечение работоспособности в условиях ухудшения параметров самого двигателя. Для отказа от дублирующей автоматики необходимо, чтобы надёжность электронного контура управления двигателем была очень высокой [5, 6].

В статье предлагаются пути повышения надёжности РЭД на основе инновационных логических элементов.

1. Структура FADEC. Основой системы FADEC является электронный регулятор РЭД (Electronic engine controller – EEC) [5, 6] (рис. 1).

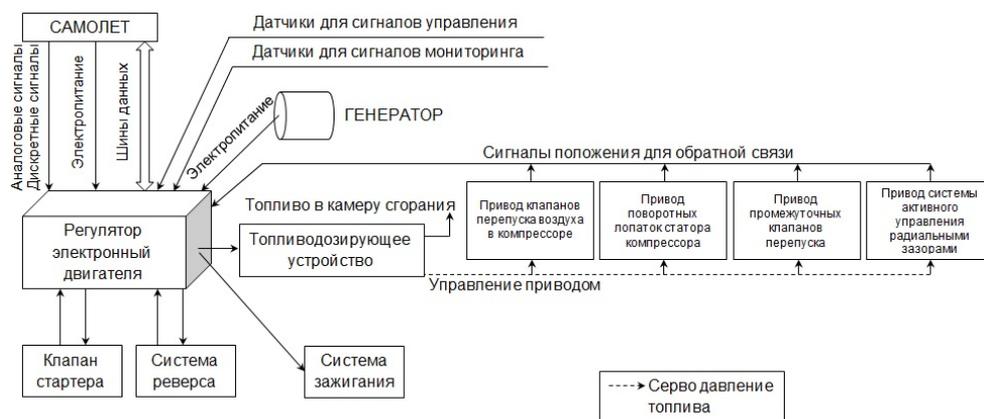


Рис. 1. Состав FADEC

В РЭД двигателя CFM56-7B (Boeing 737) используются два независимых компьютера, которые имеют названия «канал А» и «канал В». Наиболее важные датчики дублируются, в отдельных случаях дублируются цепи питания и управления каждого канала (некоторые датчики дублируются для каждого параметра). Дублируются соединители и кабели с РЭД. Цепи управления разнесены с цепями питания во избежание короткого замыкания (рис. 2).

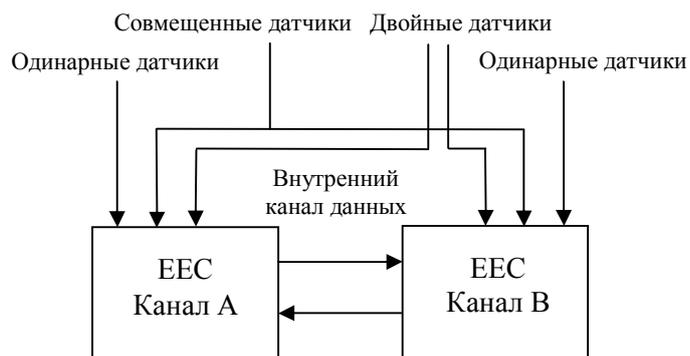


Рис. 2. Соединение датчиков с РЭД

Схема получения каналами РЭД данных от систем самолёта изображена на рис. 3.



Рис. 3. Схема получения данных РЭД

Все входные сигналы РЭД дублированы и обрабатываются одновременно двумя каналами, однако на выход поступают данные лишь с одного канала, который является командным; второй канал называется резервным, но он может стать командным при следующем запуске двигателя, если при самопроверке основной окажется неисправным. В РЭД широко применяют программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС), например, типа FPGA (field-programmable gate array) [7–9]. Используются и ПЛИС типа CPLD (Complex Programmable Logic Device) [10–14].

Количество транзисторов в современных ПЛИС достигает нескольких миллиардов, а количество логических элементов – миллионов, разработаны и адаптивные логические элементы (АЛМ). Имеются примеры ПЛИС FPGA с резервированием [15, 16].

2. Резервирование РЭД на транзисторном уровне. С целью повышения надёжности FADEC предлагается резервирование на транзисторном уровне [17–19]. Тогда предлагаемое выражение вероятности безотказной (бессбойной) работы транзисторов по каждой переменной для экспоненциальной модели Вейбулла, используемой в том числе для оценки радиационной стойкости, имеет вид:

$$\sum_{i=1}^r C_{(r+1)^2}^i \left\{ e^{-[(r+1)^2-i]\lambda t^\alpha} \cdot (1 - e^{-\lambda t^\alpha}) \right\}, \quad (1)$$

где λ – интенсивность отказов одного канала, α – коэффициент распределения Вейбулла, $1 \geq \alpha \leq 2$, t – время работы, r – число парируемых отказов.

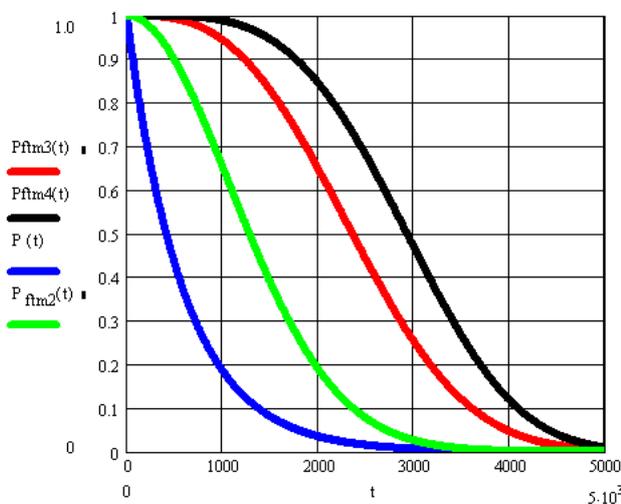


Рис. 4. Изменение вероятностей безотказной (бессбойной) работы нерезервированного транзистора, схемы, парирующей один отказ $P(t)_{fm2}$, схемы, парирующей два отказа $P(t)_{fm3}$, и схемы, парирующей три отказа $P(t)_{fm4}$, при $\lambda = 10^{-5}$

Например, в случае $r = 1$ гарантируется парирование отказа или сбоя любого одного транзистора в каждой «четвёрке», но затраты в количестве транзисторов возрастают с 1 до $(r + 1)^2$. Проблемой является соблюдение ограничений Мида–Конвей на число последовательно соединённых транзисторов: обычно это четыре транзистора, в постоянных запоминающих устройствах ПЛИС (LUT – Look Up Table) это ограничение принято равным трем [20]. Графики изменения вероятностей безотказной (бессбойной) работы одного нерезервированного

транзистора $P(t)$, схемы FCT ($r = 1$), парирующей один отказ $P(t)_{fm2}$, схемы FCT ($r = 2$), парирующей два отказа $P(t)_{fm3}$, и схемы FCT ($r = 3$), парирующей три отказа $P(t)_{fm4}$, изображены на рис. 4.

3. Скользящее резервирование элементов РЭД. С целью повышения надёжности FADEC предлагается использование скользящего резервирования, возможности которого предоставляют современные ПЛИС. Необходимо только обеспечить возможность оперативной реконфигурации всей или части ПЛИС (такие возможности уже обеспечиваются некоторыми производителями). При этом возникает возможность восстановления LUT за счёт использования остаточной функциональности. Так, возможно использовать работоспособную половину LUT, а из этих «половинок» пополнять резерв элементов.

При n основных элементах и m резервных скользящее резервирование обеспечивает работоспособность системы в случае, если работоспособно подмножество R элементов мощностью $|R| \geq n$:

$$P_{\text{СССР}}(n, m, t) = \sum_{i=n}^{n+m} C_{n+m}^i \cdot e^{-i\lambda t^\alpha} \cdot [1 - e^{-\lambda t^\alpha}]^{n+m-i}. \quad (2)$$

Пусть δ – максимальное требуемое количество отказавших элементов для восстановления исходной функции, $\lfloor \cdot \rfloor$ – ближайшее меньшее целое натуральное число (ceil). Тогда

$$v = \left\lfloor \frac{m}{\delta} \right\rfloor. \quad (3)$$

С учетом наличия переключающего устройства (ПУ) получим:

$$P_{\text{СССР}}(n, m, t) = \sum_{i=n}^{n+m} C_{n+m}^i \cdot e^{-i\lambda t^\alpha} \cdot (1 - e^{-\lambda t^\alpha})^{n+m-i} \cdot e^{-\lambda_{\text{пу}} t^\alpha} + \sum_{j=1}^{\left\lfloor \frac{m}{\delta} \right\rfloor} C_{n+m}^i \cdot e^{-(n-j)\lambda t^\alpha} \cdot (1 - e^{-\lambda t^\alpha})^{m+j} \cdot e^{-\lambda_{\text{пу}} t^\alpha} \cdot e^{-\lambda_{\text{пу}} t^\alpha}. \quad (4)$$

Соответствующие графики – без учёта интенсивности отказов переключающего устройства и с учётом интенсивности отказов переключающего устройства – изображены на рис. 5, 6.

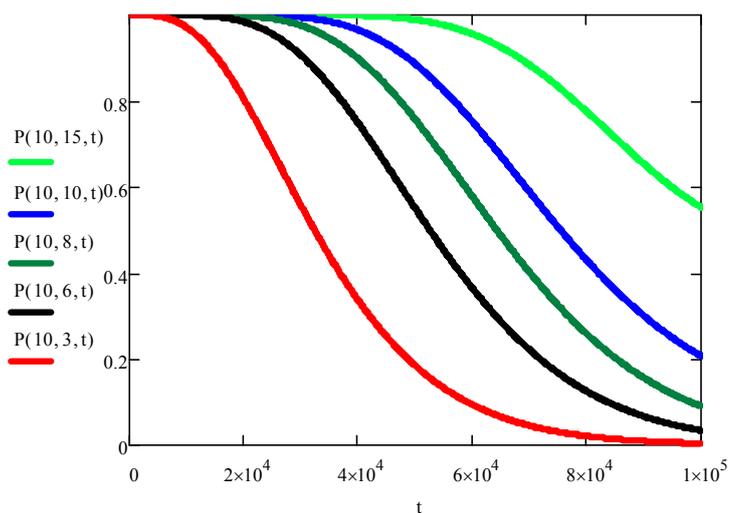


Рис. 5. Изменение P_{CCCP} с частичным восстановлением от числа резервных элементов m , основных n , времени t при $\lambda = 10^{-5}$ при $\delta = 3$, без учета интенсивности отказов переключающего устройства

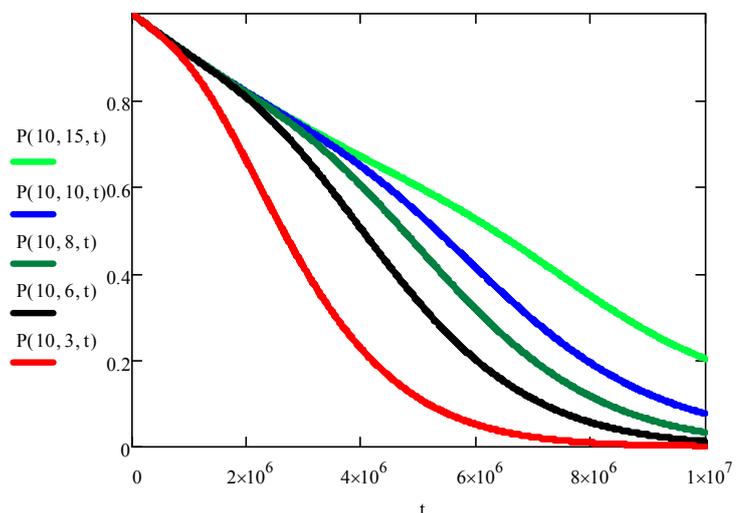


Рис. 6. Изменение P_{CCCP} с частичным восстановлением от числа резервных элементов m , основных n , времени t при $\lambda = 10^{-5}$ при $\delta = 3$, с учетом интенсивности отказов переключающего устройства $\lambda_{пу} = 10^{-7}$

Выводы. Таким образом, использование резервирования на транзисторном уровне позволяет существенно увеличить вероятность безотказной (бесбойной) работы ПЛИС, используемых в РЭД. Однако это требует существенной избыточности соблюдения ограничений

Мида–Конвей. Менее избыточным вариантом может быть скользящее резервирование в ПЛИС РЭД, что может обеспечить восстановление отказавшего канала (с возможным снижением производительности) и использовать его для контроля командного канала в процессе полёта.

Библиографический список

1. Система управления самолетом [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.studfiles.ru/preview/2021544/page:7/> (дата обращения: 18.06.2017).
2. Иноземцев А.А. О программе создания авиационных газотурбинных двигателей пятого поколения для семейства самолётов МС-21 // Вестник Пермского научного центра УрО РАН. – 2010. – № 4. – С. 28–46.
3. Иноземцев А.А. История МиГ-31 продолжается [Электронный ресурс]. – URL: <http://vpk-news.ru/ARTICLES/15110> (дата обращения: 18.06.2017).
4. «ОДК-СТАР» [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.aostar.ru/ru/search/node> (дата обращения: 18.06.2017).
5. Fundamentals of Aircraft Turbine Engine Control [Электронный ресурс]. – URL: https://www.grc.nasa.gov/www/cdtb/aboutus/Fundamentals_of_Engine_Control.pdf (дата обращения: 18.06.2017).
6. Propulsion Controls and Diagnostics Research at NASA Glenn [Электронный ресурс]. – URL: https://www.grc.nasa.gov/WWW/cdtb/aboutus/ric_overview_200707jpc.old.pdf (дата обращения: 18.06.2017).
7. Угрюмов Е.П. Цифровая схемотехника: учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – 782 с.
8. Строгонов А., Цыбин С. Программируемая коммутация ПЛИС: взгляд изнутри [Электронный ресурс]. – URL: http://www.kit-e.ru/articles/plis/2010_11_56.php (дата обращения: 11.11.2017).
9. Виды программируемой логики [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.pvsm.ru/programmirovanie/87810> (дата обращения: 10.06.2017).
10. Programmable Logic Devices [Электронный ресурс]. – URL: http://ee.sharif.edu/~logic_circuits_t/readings/PLD.pdf (дата обращения: 04.06.2017).
11. Программируемая логика и её применение в микропроцессорных системах [Электронный ресурс]. – URL: <http://lektsii.org/7-10275.html> (дата обращения: 08.06.2017).

12. CPLD (Complex Programmable Logic Device) [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.myshared.ru/slide/981511/> (дата обращения: 09.12.2017).

13. Brown Stephen, Rose Jonathan. Architecture of FPGAs and CPLDs: A Tutorial [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.eecg.toronto.edu/~jayar/pubs/brown/survey.pdf>. (дата обращения: 10.06.2017).

14. Logic Array Blocks and Adaptive Logic Modules in Stratix III Devices [Электронный ресурс]. – URL: https://www.altera.com.cn/content/dam/alterawww/global/zh_CN/pdfs/literature/hb/stx3/stx3_siii51002.pdf (дата обращения: 08.12.2017).

15. Carmichael Carl. Triple Module Redundancy Design Techniques for Virtex FPGAs [Электронный ресурс]. – URL: https://www.xilinx.com/support/documentation/application_notes/xapp197.pdf (дата обращения: 07.12.2017).

16. Xilinx Reduces Risk and Increases Efficiency for IEC61508 and ISO26262 Certified Safety Applications. WP461 (v1.0) April 9, 2015 [Электронный ресурс]. – URL: http://www.xilinx.com/support/documentation/white_papers/wp461-functional-safety.pdf (дата обращения: 20.11.2017).

17. Тюрин С.Ф. Статическая оперативная память на основе отказоустойчивой ячейки базового матричного кристалла // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2016. – № 1(17). – С. 16-27.

18. Тюрин С.Ф. Радиационно-устойчивая ячейка SRAM // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2014. – № 4(12). – С. 14–30.

19. Тюрин С.Ф., Прохоров А.С. Отказоустойчивая программируемая логическая матрица // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2017. – № 23. – С. 45–58.

20. Carver A. Mead, Lynn Conway. Introduction to VLSI Systems [Электронный ресурс]. – URL: <http://ai.eecs.umich.edu/people/conway/VLSI/VLSIText/PP-V2/V2.pdf>; <https://ru.scribd.com/document/104510240/VLSI-Introduction-to-VLSI-Systems-Mead-amp-Conway> (дата обращения: 21.10.2017).

References

1. Sistema upravleniia samoletom [Aircraft control system], available at: <http://www.studfiles.ru/preview/2021544/page:7/> (accessed 18 June 2017).
2. Inozemtsev A.A. O programme sozdaniia aviatsionnykh gazoturbinnykh dvigatelei piatogo pokoleniia dlia semeistva samoletov MS-21 [About the program of creation of aviation gas-turbine engines of the fifth generation for the family of aircraft MS-21]. *Vestnik Permskogo nauchnogo tsentra UrO RAN*, 2010, no. 4, pp. 28-46.
3. Inozemtsev A.A. Istoriia MiG-31 prodolzhaetsia, available at: <http://vpk-news.ru/ARTICLES/15110> (accessed 18 June 2017).
4. JSC STAR, available at: <http://www.ao-star.ru/ru/search/node> (accessed 18 June 2017).
5. Fundamentals of Aircraft Turbine Engine Control, available at: https://www.grc.nasa.gov/www/cdtb/aboutus/Fundamentals_of_Engine_Control.pdf (accessed 18 June 2017).
6. Propulsion Controls and Diagnostics Research at NASA Glenn, available at: https://www.grc.nasa.gov/WWW/cdtb/aboutus/ric_overview_200707jpc.old.pdf (accessed 18 June 2017).
7. Ugriumov E.P. Tsifrovaia skhemotekhnika [Digital circuitry]. 2nd ed. Ed. E.P. Ugryumov. Saint Petersburg: BHV-Peterburg, 2007. 782 p.
8. Strogonov A., Tsybin S. Programmiruemaia kommutatsiia PLIS: vzgliad iznutri [Programmable switching FPGA: a view from the inside], available at: http://www.kit-e.ru/articles/plis/2010_11_56.php (accessed 11 November 2017).
9. Vidy programmiruemoi logiki [Types of programmable logic], available at: <http://www.pvsm.ru/programmirovanie/87810> (accessed 10 June 2017).
10. Programmable Logic Devices, available at: http://ee.sharif.edu/~logic_circuits_t/readings/PLD.pdf (accessed 4 June 2017).
11. Programmiruemaia logika i ee primenenie v mikroprotssornykh sistemakh [Programmable logic and its application in microprocessor systems], available at: <http://leksi.org/7-10275.html> (accessed 8 June 2017).
12. CPLD (Complex Programmable Logic Device), available at: <http://www.myshared.ru/slide/981511/> (accessed 9 December 2017).
13. Stephen Brown, Jonathan Rose. Architecture of FPGAs and CPLDs: A Tutorial, available at: <http://www.eecg.toronto.edu/~jayar/pubs/brown/survey.pdf> (accessed 10 June 2017).

14. Logic Array Blocks and Adaptive Logic Modules in Stratix III Devices, available at: https://www.altera.com.cn/content/dam/alterawww/global/zh_CN/pdfs/literature/hb/stx3/stx3_siii51002.pdf (accessed 8 December 2017).

15. Carl Carmichael. Triple Module Redundancy Design Techniques for Virtex FPGAs, available at: https://www.xilinx.com/support/documentation/application_notes/xapp197.pdf (accessed 7 December 2017).

16. Xilinx Reduces Risk and Increases Efficiency for IEC61508 and ISO26262 Certified Safety Applications. WP461 (v1.0) April 9, 2015, available at: http://www.xilinx.com/support/documentation/white_papers/wp461-functional-safety.pdf (accessed 20 November 2017).

17. Tiurin S.F. Sticheskaia operativnaia pamiat' na osnove otkazoustoichivoi iacheiki bazovogo matrichnogo kristalla [Static RAM based on a fault-tolerant cell of the base matrix crystal]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2016, no. 1(17), pp. 16-27.

18. Tiurin S.F. Radiatsionno-ustoichivaia iacheika SRAM [Radiation-resistant SRAM cell]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2014, no. 4(12), pp. 14-30.

19. Tiurin S.F., Prokhorov A.S. Otkazoustoichivaia programmi-ruemaia logicheskaia matritsa [Fault-tolerant programmable logic matrix]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2017, no. 23, pp. 46-58.

20. Carver A. Mead, Lynn Conway. Introduction to VLSI Systems, available at: <http://ai.eecs.umich.edu/people/conway/VLSI/VLSIText/PP-V2/V2.pdf>; <https://ru.scribd.com/document/104510240/VLSI-Introduction-to-VLSI-Systems-Mead-amp-Conway> (accessed 21 October 2017).

Сведения об авторах

Греков Артем Владимирович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» Пермского военного института войск национальной гвардии Российской Федерации (614112, Пермь, ул. Гремячий Лог, 1, e-mail: grekartemvl@mail.ru).

Тюрин Сергей Феофентович (Пермь, Россия) – заслуженный изобретатель Российской Федерации, доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета; профессор кафедры «Математическое обеспечение вычислительных систем» Пермского государственного национального исследовательского университета, (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: tyurinsergfeo@yandex.ru).

About the authors

Grekov Artem Vladimirovich (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Software computer technology and automated systems, Perm military institute of National Guard Troops of the Russian Federation (614112, Perm, 1, Gremyachy Log Street, grekartemvl@mail.ru).

Tyurin Sergey Feofentovich (Perm, Russian Federation) – Honored Inventor of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Automation and Telemechanics, Electrical Engineering Faculty; Perm National Research Polytechnic University; Perm State National Research University; Department of Mathematical Support of Computer Systems, Faculty of Mechanics and Mathematics. (614990, Perm, 29, Komsomolsky av., e-mail: tyurinsergfeo@yandex.ru).

Получено 30.01.2018