

Вячеслав М. Барбашов¹, Олег А. Калашников²

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
115409, Москва, Каширское шоссе, 31, Россия

e-mail: VMBarbashov@mephi.ru, ORCID 0000-0001-7136-415X

²АО «ЭНПОСПЭЛС»

115409, Москва, Каширское шоссе, 31, Россия

e-mail: oakal@spels.ru, ORCID 0000-0002-9473-9900

ФУНКЦИОНАЛЬНО-ЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДОЗОВЫХ
РАДИАЦИОННЫХ ОТКАЗОВ СФ-БЛОКОВ СИСТЕМ НА КРИСТАЛЛЕ

DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2017.4.09>

Аннотация: Рассмотрена методика функционально-логического моделирования дозовых радиационных отказов систем на кристалле, основанная на методе критериальных функций принадлежности. Проведен анализ возможностей данного подхода для определения работоспособности СФ-блоков и влияния на нее режимов функционирования. Исследованы особенности применения методики для моделирования дозовых радиационных отказов различных типов СФ-блоков: логических элементов, блоков и ячеек памяти, процессоров. Приведены примеры построения критериальных функций принадлежности и функций работоспособности этих СФ-блоков по различным критическим параметрам, характеризующим их отказы. Показано, что при моделировании дозовых отказов необходимо учитывать влияние режима функционирования в процессе облучения на параметры моделей. Предложенная методика позволяет повысить достоверность оценки показателей радиационной стойкости СнК, в том числе с целью решения задач обеспечения информационной безопасности радиоэлектронной аппаратуры.

Ключевые слова: СнК, дозовые радиационные отказы, функционально-логическое моделирование.

Для цитирования. БАРБАШОВ, Вячеслав М.; КАЛАШНИКОВ, Олег А. ФУНКЦИОНАЛЬНО-ЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДОЗОВЫХ РАДИАЦИОННЫХ ОТКАЗОВ СФ-БЛОКОВ СИСТЕМ НА КРИСТАЛЛЕ. Безопасность информационных технологий, [S.l.], v. 24, n. 4, p. 80-86, nov. 2017. ISSN 2074-7136. Доступно на: <<https://bit.mephi.ru/index.php/bit/article/view/283>>. Дата доступа: 29 nov. 2017. doi:<http://dx.doi.org/10.26583/bit.2017.4.09>.

Vyacheslav M. Barbashov¹, Oleg A. Kalashnikov²

¹National Research Nuclear University MEPHI

Kashirskoeshosse, 31, Moscow, 115409, Russia

e-mail: VMBarbashov@mephi.ru, ORCID 0000-0001-7136-415X

²JSC "ENGOs SPELS",

Kashirskoeshosse, 31, Moscow, 115409, Russia

e-mail: oakal@spels.ru, ORCID 0000-0002-9473-9900

Functional-logic simulation of IP-blocks dose functional failures

DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2017.4.09>

Abstract. The technique of functional-logical simulation of System-on-Chip (SoC) total dose radiation failures is presented based on fuzzy logic sets theory. An analysis of the capabilities of this approach for IP-blocks radiation behavior is carried out along with the analysis of operating modes under irradiation influence on IP-blocks radiation behavior. The following elements of this technique application for simulation of dose radiation failures of various types of IP-units are studied: logical elements, memory units and cells, processors. Examples of criterial membership functions and operability functions construction are given for these IP-units and for various critical parameters characterizing their failures. It is shown that when modeling total dose failures it is necessary to take into account the influence of the functional mode on the

model parameters. The technique proposed allows improving the reliability of the SoC radiation hardness estimation, also for the purpose of solving the problems of information security of electronic devices.

Keywords: SoC, total dose failures, functional-logical simulation.

For citation. BARBASHOV, Vyacheslav M.; KALASHNIKOV, Oleg A. Functional-logic simulation of IP-blocks dose functional failures. IT Security, [S.l.], v. 24, n. 4, p. 80-86, nov. 2017. ISSN 2074-7136. Available at: <<https://bit.mephi.ru/index.php/bit/article/view/283>>. Date accessed: 29 nov. 2017. doi:<http://dx.doi.org/10.26583/bit.2017.4.09>.

Повышение сложности и функциональной насыщенности радиоэлектронных систем и комплексов невозможно без внедрения современной электронно-компонентной базы (ЭКБ), такой как «системы на кристалле» (СнК). Их применение радикально улучшает массогабаритные показатели, потребляемую мощность, быстродействие и функциональные возможности радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Применение СнК на основе сложно-функциональных блоков (СФ-блоков) дает разработчику РЭА широкие возможности по гибкому управлению системными ресурсами, оперативному созданию аппаратурно и системно ориентированных СнК [1].

Современные радиоэлектронные системы и комплексы специальной техники в составе бортовых атомно-энергетических и ядерных комплексов, космических аппаратов, авиационных систем должны функционировать в жестких условиях эксплуатации, подвергаясь различным видам радиационных воздействий. Для решения задач по обеспечению радиационной стойкости таких систем необходимо определять и контролировать стойкость используемой ЭКБ, в том числе СнК, как на этапе производства, так и на стадии выбора ЭКБ при проектировании РЭА [2-4].

Возможности экспериментальной оценки радиационной стойкости сверхбольших интегральных схем (СБИС) класса СнК ограничены, т.к., с одной стороны, такая оценка сопряжена со значительными временными и трудовыми затратами по подготовке и проведению радиационных испытаний, а с другой – не всегда дает достоверный результат в силу значительного разнообразия функциональных узлов в составе СнК и режимов их работы [5]. Альтернативой является расчетный подход к оценке стойкости. В [6,7] предложен метод функционально-логического моделирования дозовых радиационных отказов цифровых интегральных схем, основанный на математическом аппарате нечеткой логики. Рассмотрим возможности данного подхода для определения работоспособности СФ-блоков и влияния на нее режимов функционирования.

Для простых логических элементов, радиационный отказ которых проявляется как деградация выходных напряжений логических "0" и "1", порог работоспособности определяется по зависимостям этих напряжений от уровня воздействия (поглощенной дозы). На рисунке 1 показана измеренная зависимость $U_{\text{вых}}^1(D)$ КМОП инвертора 564ЛН2. Аналогично выглядят зависимости $U_{\text{вых}}^1(D)$ и для других логических КМОП элементов (И-НЕ, ИЛИ-НЕ). Их резкий характер позволяет легко определить порог работоспособности [8].

Такой же подход нередко применим и для СФ-блоков. На рисунке 2 показаны измеренные зависимости напряжений выходных логических уровней "0" и "1" СФ-блока постоянного запоминающего устройства с электрическим стиранием (ЭСПЗУ) от поглощенной дозы [9]. Показаны также рассчитанные по этим зависимостям функции принадлежности, причем в качестве критериев выбраны указанные в спецификации предельно допустимые значения (1,2 В для логической "1" и 0,2 В для логического "0" при $E_{\text{пит}} = 2,5$ В).

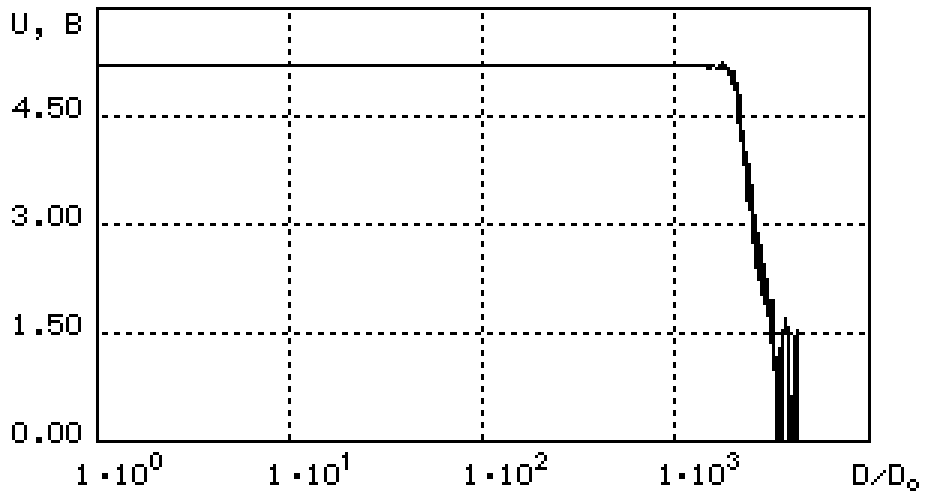


Рисунок 1 – Дозовая зависимость выходного напряжения высокого уровня КМОП инвертора 564ЛН2
 (Fig. 1 – Dose-dependent output voltage high-level CMOS inverter 564ЛН2)

Одновременно производился функциональный контроль ЭСПЗУ, по результатам которого рассчитана функция работоспособности Ψ (отношение числа неисправных ячеек памяти к их общему числу), также изображенная на рисунке 2. Видно, что о работоспособности ЭСПЗУ можно достаточно точно судить по изменению уровня логического "0".

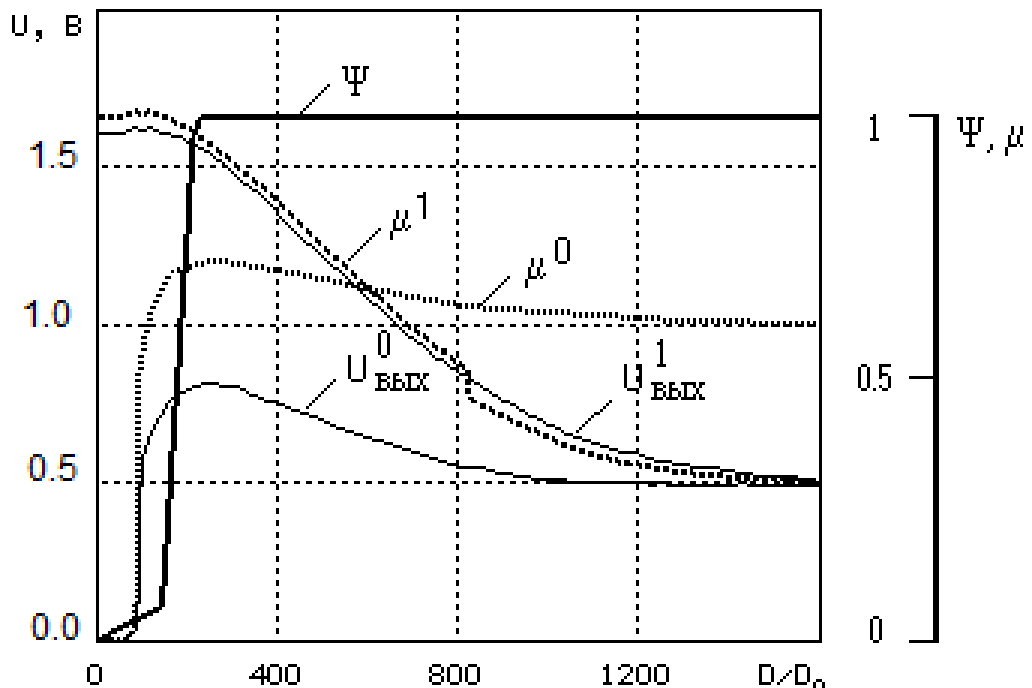


Рисунок 2 – Зависимости напряжений выходных логических уровней "0" и "1" СФ-блока ЭСПЗУ от поглощенной дозы и критериальные функции принадлежности
 (Fig. 2 – Dependence of the stress output logical levels "0" and "1" SF-block from the absorbed dose and criteria-based membership function)

В ряде случаев важным критериальным параметром работоспособности может служить ток потребления. В качестве примера на рисунке 3 показана дозовая зависимость тока потребления СФ-блока процессора вместе с моментом наступления функционального

отказа процессора, который, как видно, практически совпадает с моментом резкого возрастания тока [10,11].

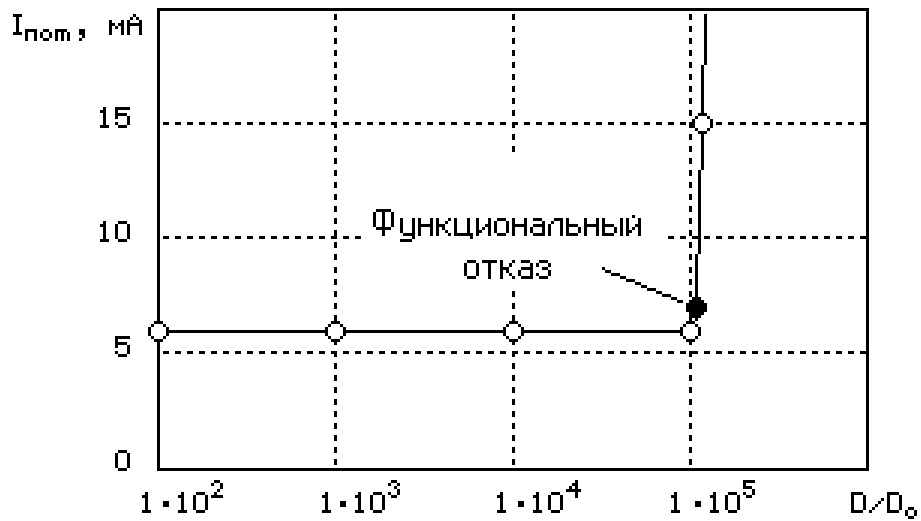


Рисунок 3 – Дозовая зависимость статического тока потребления и момент функционального отказа СФ-блока процессора
 (Fig. 3 - Dose dependence of the static current consumption and the time of functional failure of the SF-block of the processor)

Анализ особенностей функциональных дозовых отказов микросхем и СФ-блоков ОЗУ показал, что в ряде случаев они проявляются как "залипание" ячеек памяти в одно из логических состояний, причем разные ячейки отказывают при существенно разных уровнях воздействия [12]. На рисунке 4 показана зависимость числа отказавших ячеек от времени воздействия в режиме "хранение 1" (отдельно ложные "0" и "1") СФ-блока оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) организацией 4К x 1. Для функционально-логического моделирования таких отказов можно воспользоваться нечеткой логической моделью, показанной на рисунке 5.

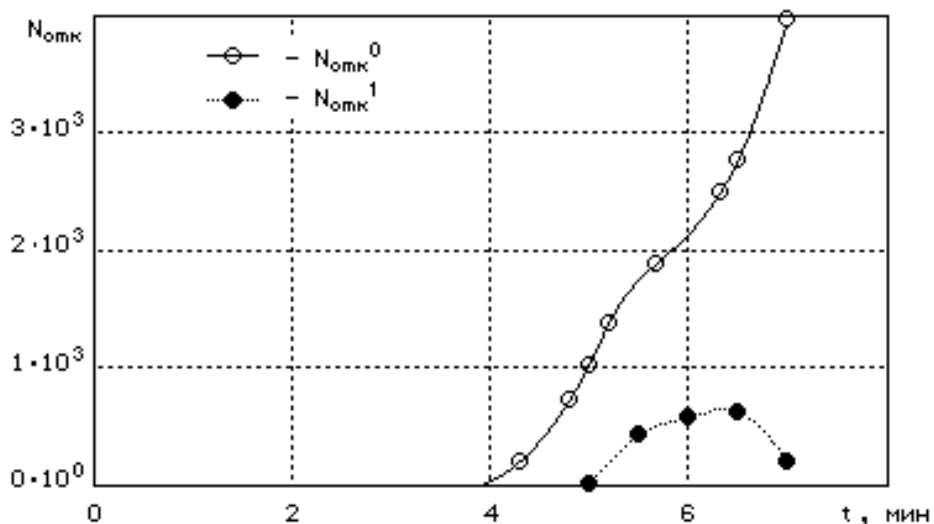


Рисунок 4 – Зависимости числа отказавших ячеек памяти СФ-блока ОЗУ от времени облучения
 (Fig. 4 – Dependence of the number of failed memory cells of SF-block RAM from the time of exposure)

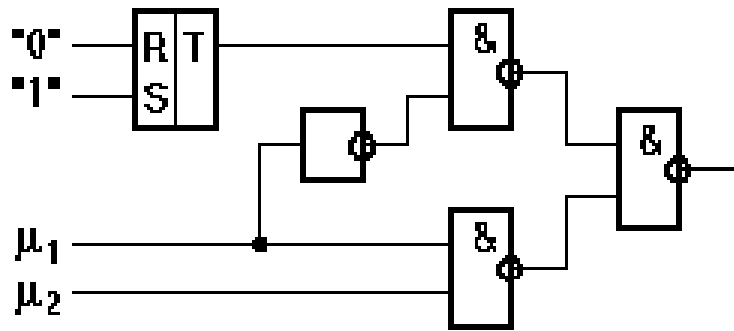


Рисунок 5 – Нечеткая логическая модель отказов ячеек памяти
 (Fig. 5 – the Fuzzy logical model of failure memory cells)

Здесь ячейка памяти ОЗУ изображена в виде триггера, а радиационный отказ моделируется введением двух функций принадлежности – μ_1 и μ_2 . Функция μ_1 отражает степень выхода ОЗУ из строя и является, по сути, функцией ее работоспособности. Функция μ_2 характеризует тип отказа. Для определения этих функций можно воспользоваться соотношениями:

$$\mu_1(D) = \frac{N_{\text{отк}}^0(D) + N_{\text{отк}}^1(D)}{N} \quad (1),$$

$$\mu_2(D) = \frac{N_{\text{отк}}^1(D)}{N_{\text{отк}}^0(D) + N_{\text{отк}}^1(D)} = \frac{N_{\text{отк}}^1(D)}{\mu_1(D) \cdot N} \quad (2),$$

где $N_{\text{отк}}^0(D)$ и $N_{\text{отк}}^1(D)$ – зависимость от уровня воздействия числа отказов типа "ложный 0" и "ложная 1" соответственно, N – число ячеек памяти. На рисунке 6 показаны полученные по этим соотношениям для зависимости рисунка 4 функции принадлежности.

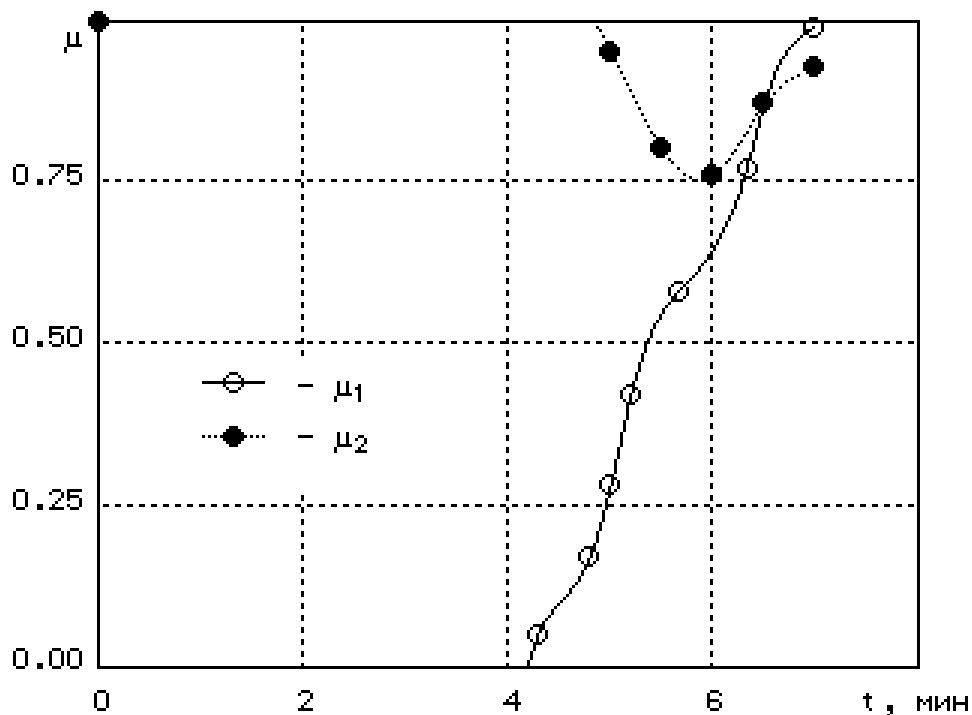


Рисунок 6– Функции принадлежности нечеткой модели отказа ячеек памяти
 СФ-блока ОЗУ
 (Fig. 6– Membership functions of a fuzzy model of failure memory cells SF-block RAM)

Очевидно, что зависимости, подобные изображенным на рисунке 6, но полученные при облучении в режиме "хранение 0", были бы совершенно другими – имело бы место "залипание" ячеек в "0". Это отразилось бы на функции типа отказа μ_2 . Таким образом, при моделировании необходимо учитывать влияние режима функционирования в процессе облучения на параметры моделей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- 1 В. Немудров, Г. Мартин. Системы-на-кристалле. Проектирование и развитие. М.: Техносфера, 2004. – 216 с.
- 2 А.Ю. Никифоров, В.А. Телец. Радиационная стойкость электронной компонентной базы систем специальной техники и связи. Спецтехника и связь, 2011, № 4-5, с. 2-3.
- 3 О.А. Калашников, П.В. Некрасов, А.Ю. Никифоров, и др. Системы на кристалле: особенности радиационного поведения и оценка радиационной стойкости. Микроэлектроника, 2016, том 45, №1, С. 36-43.
- 4 А.Ю. Никифоров, П.К. Скоробогатов, М.Н. Стриханов, В.А. Телец, А.И. Чумаков. Развитие базовой технологии прогнозирования, оценки и контроля радиационной стойкости изделий микроэлектроники. Известия вузов. Электроника, 2012, № 5 (97), с. 18-23.
- 5 Д.В. Бобровский, Г.Г. Давыдов, А.Г. Петров, и др. Реализация базовых методов радиационных испытаний ЭКБ на основе аппаратно-программного комплекса аппаратуры National Instruments. Известия вузов. Электроника, №5(97), 2012, С. 91-104.
- 6 О.А. Калашников. Расчетно-экспериментальное моделирование дозовых радиационных функциональных отказов цифровых СБИС. Безопасность информационных технологий, 2016-3, С. 34-39.
- 7 Е.Р. Аствацатурьян, В.А. Беляев, Н.С. Трушкин. Функционально-логическое моделирование радиационного поведения цифровых устройств. Препринт МИФИ, 016-93, 1993, 28 с.
- 8 Г.Г. Давыдов, А.В. Согоян, А.Ю. Никифоров, и др. Методика оперативного неразрушающего контроля дозовой стойкости КМОП БИС на КНС структурах. Микроэлектроника, 2008, том 37, № 1, с. 67-77.
- 9 А.Б. Боруздина, А.В. Уланова, Н.Г. Григорьев, А.Ю. Никифоров. Дозовая деградация динамических параметров микросхем памяти. Микроэлектроника, 2012, т. 41, № 4, с. 284-290.
- 10 П.В. Некрасов, А.А. Демидов, О.А. Калашников. Функциональный контроль микропроцессоров при проведении радиационных испытаний. Приборы и техника эксперимента, № 2, Март-Апрель 2009, С. 48-52.
- 11 Д.В. Бобровский, В.С. Волин, П.В. Некрасов, О.А. Калашников, Ю.С. Рябцев. Радиационная стойкость микропроцессоров семейства "МЦСТ-R". Вопросы радиоэлектроники, серия ЭВТ, выпуск 3, 2010 г.
- 12 В.В. Елесин, Г.Н. Назарова, Г.В. Чуков, Ю.А. Кабальнов, А.А. Титаренко. Исследование возможности разработки радиационно-стойких БИС навигационного назначения по отечественной КМОП КНИ технологии с нормами 0.35 мкм. Микроэлектроника, 2012, т. 41, № 4, с. 291-303.

REFERENCES:

- [1] V.Nemudrov, G.Martin. System-on-chip. The design and development.. М.: Tehnosfera, 2004. – 216 p. (In Russian).
- [2] A.Yu. Nikiforov, V.A. Telets. Radiation resistance of electronic component base systems special technology and communication. Spetstechnika i svyaz, 2011, N 4-5, p. 2-3. (In Russian).
- [3] O.A. Kalashnikov, P.V. Nekrasov, A.Yu. Nikiforov, and other. System on a chip: the features of the radiation behavior of the radiation resistance. Mikroelektronika, 2016, tom 45, N1, P. 36-43. (In Russian).
- [4] A.Yu. Nikiforov, P.K. Skorobogatov, M.N. Strihanov, V.A. Telets, A.I. Chumakov. The development of basic technology forecasting, assessment and control of radiation resistance of microelectronic devices. Izvestiya vuzov. Elektronika, 2012, N 5 (97), p. 18-23. (In Russian).
- [5] D.V. Bobrovskiy, G.G. Davyidov, A.G. Petrov, and other. Implementation of basic methods of radiation tests of electronic components based on hardware and software equipment National Instruments. Izvestiya vuzov. Elektronika, N 5(97), 2012, P. 91-104. (In Russian).
- [6] O.A. Kalashnikov. Experiment-calculated modeling of radiation dose functional failures of digital VLSI. Bezopasnost` Informatsionnykh Tekhnologiy ISSN: 2074-7128 (Print); ISSN: 2074-7136 (On-Line), v.23, N3(2016), P. 34-39. (In Russian).
- [7] E.R. Astvatsaturyan, V.A. Belyaev, N.S. Trushkin. Functional logic simulation of radiation behavior of digital devices. Preprint MIFI, 016-93, 1993, 28 p. (In Russian).
- [8] G.G. Davyidov, A.V. Sogoyan, A.Yu. Nikiforov, i dr. The technique of rapid non-destructive testing dose resistance of CMOS IC at the SPS structures. Mikroelektronika, 2008, tom 37, N 1, p. 67-77. (In Russian).
- [9] A.B. Boruzdina, A.V. Ulanova, N.G. Grigorev, A.Yu. Nikiforov. Dose the degradation of the dynamic parameters of the memory chips. Mikroelektronika, 2012, t. 41, N 4, p. 284-290. (In Russian).
- [10] P.V. Nekrasov, A.A. Demidov, O.A. Kalashnikov. Functional control of microprocessors during radiation tests. Pribory i itehnika eksperimenta, N 2, Mart-April 2009, P. 48-52. (In Russian).

- [11] D.V. Bobrovskiy, V.S. Volin, P.V. Nekrasov, O.A. Kalashnikov, Yu.S. Ryabtsev. Radiation resistance of the microprocessors of the family "MCST-R". Voprosy radioelektroniki, seriya EVT, vyipusk 3, 2010 g. (In Russian).
[12] V.V. Elesin, G.N. Nazarova, G.V. Chukov, Yu.A. Kabalnov, A.A. Titarenko. A feasibility study on the development of radiation-resistant BIS of the navigation destination at domestic CMOS SOI technology with the norms of 0.35 μm . Mikroelektronika, 2012, t. 41, N 4, p. 291-303. (In Russian).

*Поступила в редакцию - 30 июня 2017 г. Окончательный вариант - 01 ноября 2017 г.
Received - June 30, 2017. The final version - November 01, 2017.*