Вячеслав М. Барбашов[1], Николай С. Трушкин[2], Виталий Г. Иваненко[3]
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Каширское ш., 31, Москва, 115409, Россия
[1]*e-mail: VMBarbashov@mephi.ru, https://orcid.org/0000-0001-7136-415X*
[2]*e-mail: NSTrushkin@mephi.ru, https://orcid.org/0000-0003-2407-084X*
[3]*e-mail: VGIvanenko@mephi.ru, https://orcid.org/0000-0003-0823-5501*

СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ БИС АППАРАТНЫХ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

DOI: http://dx.doi.org/10.26583/bit.2022.1.02

Аннотация. В настоящее время наблюдается тенденция использования аппаратных средств защиты информации (СЗИ) в экстремальных условиях эксплуатации, в частности, при наличии мощного радиационного излучения. В связи с этим актуализируется проблема оценки устойчивости работы СЗИ, которая определяется радиационной стойкостью входящих в их состав больших цифровых интегральных схем (БИС). В настоящей работе рассмотрены методы оценки радиационной стойкости БИС в виде статических и динамических отказов, определяемых на основе функционально-логического моделирования БИС в условиях ионизирующего излучения. Показано, что в ряде случаев потери информационной устойчивости работы СЗИ характерны детерминированные и недетерминированные отказы при воздействии дестабилизирующего фактора. Предложены методы прогнозирования радиационной стойкости БИС, которые основаны на моделях нечеткого цифрового и вероятностного надежностного автоматов. В первом случае, поведение аппаратных СЗИ определяется конкретным соотношением радиационно-чувствительных параметров его элементов, во втором, статистическим разбросом моментов переключения приводящих к изменению логики работы однотипных образцов. Причем характер их изменения при облучении зависит от многих факторов, включая тип излучения, его интенсивность и спектр, вид критериального параметра характеризующего радиационную стойкость БИС и режим работы. Анализ такого сопоставления является необходимым этапом для оценки радиационной стойкости БИС, что позволяет сформулировать подходы к анализу сигнальных сбоев цифровых устройств позволяющих обеспечить защиту информации.

Ключевые слова: аппаратные средства, детерминированные и недетерминированные отказы, защита информации, интегральная оценка, нечеткая вероятность, радиационная стойкость, устойчивость.

Для цитирования: БАРБАШОВ, Вячеслав М.; ТРУШКИН, Николай С.; ИВАНЕНКО, Виталий Г. СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ БИС АППАРАТНЫХ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ. Безопасность информационных технологий, [S.l.], т. 29, № 1, с. 9–16, 2022. ISSN 2074-7136. URL: https://bit.mephi.ru/index.php/bit/article/view/1405. DOI: http://dx.doi.org/10.26583/bit.2022.1.02.

Vyacheslav M. Barbashov[1], Nikolai S. Trushkin[2], Vitaliy G. Ivanenko[3]
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute),
Kashirskoe shosse, 31, Moscow, 115409, Russia
[1]*e-mail: VMBarbashov@mephi.ru, https://orcid.org/0000-0001-7136-415X*
[2]*e-mail: NSTrushkin@mephi.ru, https://orcid.org/0000-0003-2407-084X*
[3]*e-mail: VGIvanenko@mephi.ru, https://orcid.org/0000-0003-0823-5501*

Static and dynamic characteristics of the integrated assessment of the radiation resistance of LSI of the hardware means of information protection

DOI: http://dx.doi.org/10.26583/bit.2022.1.02

Abstract. Currently, there is a tendency to use the hardware means of information protection in extreme operating conditions, in particular, in the presence of powerful radiation. In this regard, the problem of

assessing the stability of the hardware means of information protection operation is being updated, which is determined by the radiation resistance of the large digital integrated circuits (LSI) that make up them. Methods for ensuring information security in the form of static and dynamic characteristics, which are based on the use of functional-logical modeling of large digital integrated circuits (LSI) under the influence of ionizing radiation, are considered. It is shown that in some cases, information security is characterized by deterministic and non-deterministic failures when exposed to ionizing radiation. Methods for predicting the information security of LSI under the influence of ionizing radiation are proposed, which are based on models of fuzzy digital and probabilistic reliability automata. In the first case, the behavior of complex devices is determined by the specific ratio of radiation-sensitive parameters of the elements, in the second case by the statistical spread of switching moments leading to changes in the logic of the same type of sample. Moreover, the nature of their changes during irradiation depends on many factors, including the type of radiation, its intensity and spectrum, the type of criterion parameter that characterizes the radiation resistance of the LSI, and the mode of operation of the microcircuits.Conducting such a comparison is a necessary step for an adequate assessment of the radiation resistance of the LSI, which allows us to develop a procedure for analyzing the resistance of digital devices.
Keywords: hardware, deterministic and non-deterministic failures, information protection, integral estimation, fuzzy probability, radiation resistance, stability.
For citation: BARBASHOV, Vyacheslav M.; TRUSHKIN, Nikolai S.; IVANENKO, Vitaliy G. Static and dynamic characteristics of the integrated assessment of the radiation resistance of LSI of the hardware means of information protection. IT Security (Russia), [S.l.], v. 29, n. 1, p. 9–16, 2022. ISSN 2074-7136. URL: https://bit.mephi.ru/index.php/bit/article/view/1405. DOI: http://dx.doi.org/10.26583/bit.2022.1.02.

Введение

В настоящее время актуальной задачей обеспечения безопасности объектов критической информационной инфраструктуры (КИИ), функционирующей в экстремальных условиях эксплуатации, является устойчивость аппаратных средств управления, в том числе, комплексов защиты информации. В свою очередь этот показатель во многом определяется безотказностью работы сложных БИС, устойчивых к воздействию дестабилизирующих факторов, например, радиационного излучения.

Создание подобных БИС невозможно без активного использования функционально-логического моделирования, обеспечивающего необходимую адекватность описания и точность расчетов. В [1] рассмотрены сигнальные сбои работы логических элементов и устройств на их основе при воздействии ионизирующего излучения (ИИ). В данной работе сделана попытка выделить параметрические отказы обусловленные изменением фаз сигналов, отвечающие за временные характеристики работы цифровых устройств, с учетом воздействия ИИ. Известно, что увеличение тактовой частоты приводит к возникновению временных сбоев логических элементов из-за разброса задержек сигналов при переключении. В результате моделирования цифровых устройств выявляются, как известно [2, 3], сигнальные сбои, в узлах, в которых могут произойти статические или динамические отказы, что в результате состязания сигналов при работе реального устройства способны привести к сигнальным сбоям логических элементов при воздействии ИИ.

При этом для оценки реального характера радиационного поведения сложной электронной системы целесообразно получить количественные характеристики вероятности сбоев и на этой основе оценить допустимые ограничения.

1. Моделирующие среды описания сигнальных сбоев логических элементов при воздействии ионизирующего излучения

Следует отметить, что критические состязания существенно зависят от логики и структуры устройства. Однако статические и динамические риски сбоев в большей степени зависят от задержек срабатывания логических элементов $t_з^{10}$, $t_з^{01}$.

В логическом элементе задержки распределены статистически по законам φ_{10} и φ_{01}. Функции φ таковы, что на границах и за пределами такта каждая из них равна «0», унимодальные и не обязательно симметричные [4].

В зависимости от соотношения величин $t_з^{10}, t_з^{01}$ логический элемент по-разному переключается. Для элемента И-НЕ при воздействии сигналов h и ε возможны переключательные характеристики, которые приведены на рис. 1.

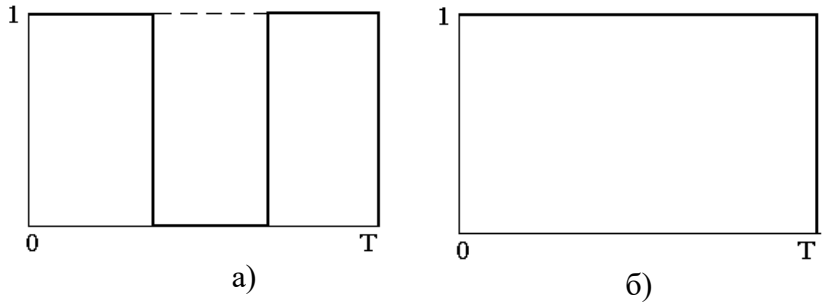

Рис. 1. Переключательные характеристики логического элемента И-НЕ при $t^{10} > t^{01}$ а) и $t^{10} < t^{01}$ б)
Fig. 1. Switching characteristic of the logic element AND-NOT at $t^{10} > t^{01}$ а) and at $t^{10} < t^{01}$ б)

Для элемента ИЛИ-НЕ аналогично получаются дуальные инверсные характеристики. Очевидно, что для однородного комбинационного блока из элементов И-НЕ, в котором превалируют элементы с характеристикой а), вероятность статистического риска сбоя резко возрастает. В исходном состоянии, при отсутствии воздействия ИИ, количество логических элементов с характеристиками а) и б) примерно одинаково и вероятность статического риска сбоев в основном зависит от вектора начального воздействия и логической структуры схемы. Хорошо известны методы нейтрализации статических и динамических рисков сбоя, но они малоэффективны при воздействии ИИ, когда начинают преобладать задержки определенного перехода. Приведенные экспериментальные данные в литературе [5] показывают, что возможны три случая появления таких задержек:

(1) начинает преобладать задержка сигнала h,

(2) начинает преобладать задержка сигнала ε,

(3) при дальнейшем росте поглощенной дозы ИИ сначала преобладает п.п (1), а затем п.п (2).

В случае (1) увеличивается количество элементов И-НЕ с характеристикой, показанной на рис. 1,а. Условно такие элементы назовем μ – элементами, их логика становится семизначной, если ввести дополнительные элементы множества модальностей. В этом случае в 7-мизначной логике для элемента И-НЕ таблицы истинности приведены на рис. 2,а, а для элемента ИЛИ-НЕ – на рис. 2,б.

В таблицах на рис. 2 через μ обозначена модальность μ элемента, а через «$\bar{\mu}$» инверсная модальность. Модальность «х» проставляется в случае разных функций переключения, или если число переключений логического элемента больше 2.

В случае, когда число переключений больше 2 переключательная характеристика для логического элемента И-НЕ приведена на рис. 1,б, а соответствующая таблица истинности – на рис. 2,а. Для логического элемента ИЛИ-НЕ таблица истинности приведена на рис. 2,б.

	0	ε	x	h	μ	$\bar{\mu}$	1
0	1	1	1	1	1	1	1
ε	1	h	x	μ	x	x	h
x	1	x	x	x	x	x	x
h	1	μ	x	ε	x	x	ε
μ	1	x	x	x	x	μ	$\bar{\mu}$
$\bar{\mu}$	1	x	x	x	μ	x	μ
1	1	h	x	ε	$\bar{\mu}$	μ	0

а)

	0	ε	x	h	μ	$\bar{\mu}$	1
0	1	h	x	ε	$\bar{\mu}$	μ	0
ε	h	h	x	0	x	x	0
x	x	x	x	x	x	x	0
h	ε	0	x	ε	x	x	0
μ	$\bar{\mu}$	x	x	x	x	$\bar{\mu}$	0
$\bar{\mu}$	μ	x	x	x	$\bar{\mu}$	x	0
1	0	0	0	0	0	0	0

б)

Рис. 2. Таблицы истинности логических элементов И-НЕ а) и ИЛИ-НЕ б) в 7-мизначной логике
Fig. 2. Tables of the truth of logical elements in 7-digit logic AND-NOT -a), OR-NOT- b)

Для случая, сигнального сбоя логического элемента показанного на рис. 3 при увеличении поглощенной дозы логические состояние переходят с одной логики на другую. При этом возникает нечеткая ситуация и в этом случае при моделировании состояний логического элемента схема рассчитывается по различным логикам, что позволяет при сравнении с экспериментом выявлять нечеткую вероятность динамических сбоев. При этом оценивается нечеткая вероятность сбоя по элементу по двум крайним ситуациям (1) и (2) [6].

	0	ε	x	h	1
0	1	1	1	1	1
ε	1	h	x	μ	h
x	1	x	x	x	x
h	1	1	x	ε	ε
1	1	h	x	ε	0

а)

	0	ε	x	h	1
0	1	h	x	ε	0
ε	h	h	x	0	0
x	x	x	x	x	0
h	ε	0	x	ε	0
1	0	0	0	0	0

б)

Рис. 3. Таблицы истинности логических элементов И-НЕ а) и ИЛИ-НЕ б)
Fig. 3. The truth tables of the logic elements AND-NOT - a), OR-NOT - b)

Пусть ν – относительная задержка $t_з^{10}$ сигнала h, ξ относительная задержка $t_з^{01}$ сигнала ε. Тогда $(\nu - \xi)$ критериальная функция на множестве [0, 1] при условии, что $\nu \geq \xi$.

Кроме указанных свойств функций распределения φ_1 и φ_2 примем, что они бесконечно дифференцируемые и вне отрезка [0, 1] тождественно равны 0, и кроме этого: $\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_1 = 1$ и $\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_2 = 1$. Этим условиям отвечает, нормальный закон распределения Гаусса.

Нечеткую вероятность в этом случае можно записать в следующем виде:

$$\tilde{P}_{10} = \iint_{\Omega} (\nu - \xi)\varphi_1 \ (\nu) \cdot \varphi_1(\xi) d\nu d\xi \,, \quad (1)$$

где $\Omega = \{[0,1] \times [0,1], \ \nu \geq \xi\}$, область Ω приведена на рис. 4.

Интеграл (1) можно преобразовать к виду:

$$\tilde{P}_{10} = \int_0^1 \nu \, \varphi_1 (\nu) \int_0^{\nu} \varphi_2 (\xi) d\xi \, d\nu - \int_0^1 \varphi_1 (\nu) \int_0^{\nu} \xi \varphi_2 (\xi) d\xi \, d\nu. \quad (2)$$

Учитывая свойства функций φ_1 и φ_2, возможно преобразовать выражения (2):

$$\tilde{P}_{10} = \int_{-\infty}^{+\infty} \nu \, \varphi_1 (\nu) \int_{-\infty}^{\nu} \varphi_2 (\xi) d\xi \, d\nu - \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_1 (\xi) d\xi \int_{-\infty}^{+\infty} \xi \varphi_2 (\xi) d\xi + \\ + \int_{-\infty 0}^{+\infty} \nu \, \varphi_2 (\nu) \int_{-\infty}^{\nu} \varphi_1 (\xi) d\xi \, d\nu. \quad (3)$$

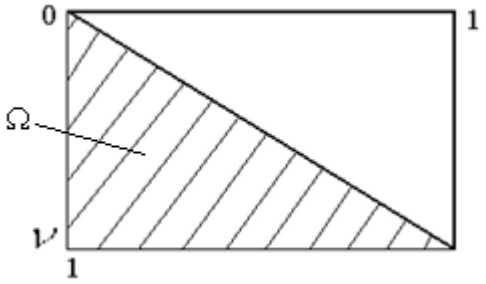

Рис. 4. Область интегрирования $\widetilde{P_{10}}$
Fig. 4. The integration area $\widetilde{P_{10}}$

При записи (3) видно, что в первом интеграле $\nu \cdot \int_{-\infty}^{\nu} \varphi_2(\xi)\, d\nu$ есть, по сути, нечеткая вероятность достижение параметра $(\xi \to \nu)$. Тогда эту функцию обозначим через $\widetilde{P_2}(\nu)$. Так как $\widetilde{P_2}(\nu)$ локально интегрируема на любом конечном отрезке из $(-\infty, +\infty)$, то данный интеграл есть не что иное, как функционал на D – пространстве φ Шварца [1] функций φ_1. Но так как φ_1 и φ_2 имеют одинаковые свойства, то их можно объединить в одно D-пространство φ. Следовательно, первый интеграл (3) можно записать в виде $< \widetilde{P_2}(\nu), \varphi >$ [7].

Второе слагаемое в (3) есть математическое ожидание ξ или максимальная нечеткая вероятность ξ, которую обозначим через M_2. Тот факт, что объекты теории вероятности могут совпадать с нечеткими характеристиками, объясняется линейной формой критериальной функции.

Третий интеграл в (3) аналогично интерпретируется как функционал по пространству φ нечеткой вероятности ν, обозначаемой через $\widetilde{P_1}(\nu)$. Таким образом, с учетом всех обозначений и допущений выражение (3) примет следующий вид:

$$\widetilde{P_{10}} = < \tilde{P}_1(\nu),\ \varphi > + < \tilde{P}_2(\nu),\ \varphi > - M_2. \qquad (4)$$

При конкретных расчетах в первом слагаемом (4) подставляется в $\widetilde{P_1} \to \varphi_1$, а вместо $\varphi \to \varphi_2$. Во втором слагаемом в $\widetilde{P_2} \to \varphi_2$, а вместо $\varphi \to \varphi_1$. При вычислении M_2 в соответствующем интеграле подставляется φ_2.

Формула (4) позволяет оценить глобально нечеткую вероятность по всем распределениям φ, удовлетворяющим вышеуказанным условиям.

Функции φ в общем случае могут быть вида:

$$\varphi = A \cdot e^{-\Psi(x-\tau)},$$

где A – нормировка, $\tau \in (0,1)$– центр распределения.

При этом функция Ψ должна удовлетворять следующим условиям:

1. Ψ – бесконечно дифференцируема
2. $\Psi(x - \tau) \underset{\substack{x\to 0\\ x\to 1}}{\to} +\infty;$
3. $\lim\limits_{\substack{x\to 0\\ x\to 1}} \left[\Psi^{(к)}(x-\tau)\cdot e^{-\Psi}\right] = 0, \quad к = 1,2,\ldots;$ (5)
4. $\Psi^1(x-\tau) = \begin{cases} 0, & x = \tau \\ \neq 0, & x \neq \tau \end{cases};$
5. $\Psi(0) = 0.$

Вне промежутка $(0, 1)$ функция φ тождественно равна 0. Следовательно, носитель у функции φ одинаковый [0, 1]. В пространстве D Лорана Шварца носители функций φ не обязательно одинаковые. Так, что в данном случае при выполнении условий (5) и фиксации носителя можно считать полученное пространство подпространством пространства D. В этом случае, так как функции φ не обязательно симметричные, то, подбирая подходящую функцию Ψ, можно аппроксимировать экспериментальные распределения конкретно для каждого логического элемента.

2. Экспериментальные исследования

Радиационная стойкость КМОП ИС как правило зависит от выполнения функционально-логической функции элемента: наименьшее изменение $t_{з.р}$ наблюдается у логического элемента НЕ рис. 5 (2), максимальные – у логического элемента 2И-НЕ рис. 5 (1) [8, 9].

Немонотонный характер зависимостей $t_{з.р}(D)$ у разных типов ИС и БИС указывает на существенную неоднородность стойкости логических элементов. В частности КМОП ИС определяются двумя процессами, которые приводят к нарушению функционирования: потеря управления транзисторами с каналом р-типа приводит к увеличению $t_{з.р}$ рис. 6 (2); потеря управления транзисторами с каналом n-типа приводит к уменьшению $t_{з.р}$ рис. 6 (1). В связи с этим, такая неоднородность приводит к отличию в радиационной стойкости внутренних узлов БИС и выражается в зависимости от функционального режима работы и внутренней организации, что подтверждается теоретически и экспериментально практически на всех типах БИС [10–12].

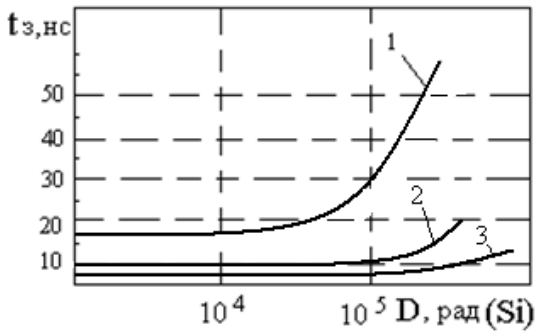

Рис. 5. Зависимость времени задержки КМОП ИС от дозы γ – облучения ^{60}Co: 1 – схема 2И-НЕ (E=5 В); 2 – схема НЕ (5 В); 3 – схема НЕ (10 В)
Fig. 5. Dependence of the delay time of CMOS IC onγ – radiation dose ^{60}Co:
1 – 2AND-NOT circuit (E=5 V); 2 – NOT circuit (5 V); 3 – NOT circuit (10 V)

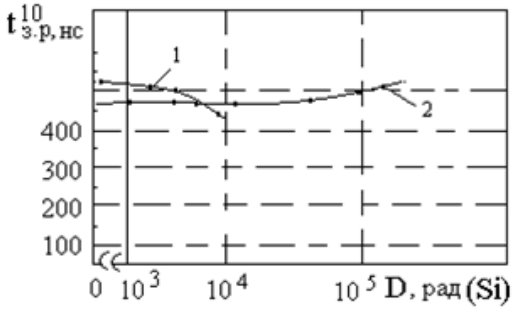

Рис. 6. Зависимость времени задержки в микропроцессоре 1802 – 1 и его радиационно-стойком варианте от поглощенной дозы – 2
Fig. 6. Dependence of the propagation delay time on the absorbed dose in the 1802 – 1 microprocessor and in its radiation-resistant version-2

Как видно на рис. 5, для ИС выполненных по КМОП технологии, наименьшие изменения времени задержки наблюдаются у логических элементов НЕ (2), а максимальные изменения – у элементов 2И-НЕ (1) [13]. Для БИС, выполненных по МОП технологии, изменения быстродействия связаны с основным радиационно-чувствительным параметром – пороговым напряжением транзистора. В зависимости от особенностей технологического

исполнения быстродействие может возрастать или уменьшаться при облучении. Так, в микропроцессоре 1802, изготовленном по КМОП технологии, рост поглащенной дозы ИИ приводит к уменьшению пороговых напряжений n-МОП транзисторов, что вызывает снижение времени задержки распространения сигнала, рис. 6 (1) [14]. В радиационно-стойком исполнении КМОП микропроцессоре, где повышена стойкость n-МОП транзисторных структур, существенную роль играет увеличение пороговых напряжений p-МОП транзисторов при увеличении поглощенной дозы. На рис. 6 (2) видно, что если поглощенная доза превышает 10^5рад (Si), то происходит рост $t_{\text{з.р}}^{10}$.

Заключение

В заключение следует отметить, что при оценке стойкости функционирования БИС в условиях радиационного облучения необходимо учитывать соотношение радиационно-чувствительных параметров элементов БИС и влияние их статистического разброса. Соотношение между функцией распределения плотности вероятности разброса и критериальной функцией принадлежности определяет, в конечном итоге, целесообразность использования функционально-логических моделей радиационного поведения БИС применительно к каждому конкретному критическому процессу.

Такое сопоставление является необходимым этапом общей процедуры анализа стойкости БИС и, следовательно, оценки устойчивости функционирования СЗИ в экстремальных условиях эксплуатации. При этом следует иметь в виду, что параметры функции распределения, характеризующие неконтролируемые статистические процессы сами по себе являются также зависимыми от радиации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Шварц Л. Математические методы для физических наук. М.: Мир, 1965. – 412 с.
2. Барбашов В.М. Моделирование функциональных отказов цифровых систем при воздействии радиации. Датчики и системы. 2011, № 6, с. 29–34. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16497840 (дата обращения: 23.05.2021).
3. Gretzer G. General Lattice Theory. 1978. Publisher: Academic Press, Inc., New York, Birkhäuser Verlag, Basel, Akademie Verlag, Berlin ISBN: 0-12-295750-4. URL: https://www.researchgate.net/publication/258514502_General_Lattice_Theory(датаобращения: 23.05.2021).
4. Барбашов В.М., Трушкин Н.С. Взаимосвязь вероятностных и порядковых моделей при моделировании функциональной безопасности БИС. Безопасность информационных технологий, [S.l.], т. 15, № 3, с. 90–95, 2008. ISSN 2074-7136. URL: https://bit.mephi.ru/index.php/bit/article/view/987 (дата обращения: 23.05.2021).
5. Барбашов В.М., Трушкин Н.С. Функционально-логическое моделирование качества функционирования ИС при воздействии радиационных и электромагнитных излучений// Микроэлектроника. 2009, т. 38, № 1, с. 34–47. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11663446 (дата обращения: 26.05.2021).
6. Барбашов В.М., Трушкин Н.С., Калашников О.А. Детерминированные и недетерминированные модели отказов бис при воздействии радиации. Микроэлектроника. Т. 44, № 5, с. 312–315, 2015. DOI: http://dx.doi.org/10.7868/S0544126915050038.
7. Нечеткие множества и теория возможностей // Под ред. Р.Р. Ягера. М.: Радио и связь, 1986. – 408 с. URL: http://www.bookre.org/reader?file=479837 (дата обращения: 23.05.2021).
8. Gibbon C.F., Hobing D.Y., Flores R.S. A Radiation-Hard Silicon Gate Bulk CMOS Cell Family. IEEE Trans.1980, vol. NS-27, no. 6, p. 1712–1715. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/TNS.1980.4331093.
9. Радиационные методы в твердотельной электронике/В.С. Вавилов, Б.М. Горин, Н.С. Данилин и др. М.: Радио и связь, 1990. – 184 с. URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01001538235 (дата обращения: 23.05.2021).
10. King E.E., Martin R.L. Effects of total dose ionizing radiation on the 1802 microprocessor. IEEE Trans., 1977, NS-24, no. 6, p. 2172–2176. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/TNS.1977.4329186.
11. Проектирование устройств вычислительной техники с учетом радиационных воздействий. Е.Р. Аствацатурьян, О.Н. Голотюк, Ю.А. Попов, П.К. Скоробогатов и др. М.: Изд. МИФИ, 1985. – 84 с. URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01001301654 (дата обращения: 23.05.2021).

12. Sogoyan A.V., Chumakov A.I., Nikiforov A.Yu. Method for Predicting CMOS Parameter Degradation Due to Ionizing Radiation with Regard to Operating Time and Conditions. Russian Microelectronics. 1999, vol. 28, no. 4, p. 224–235. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13747675 (дата обращения: 23.05.2021).
13. Kalashnikov O.A. and NikiforovA.Y. TID behavior of complex multifunctional VLSI devices, 2014 29th International Conference on Microelectronics Proceedings – MIEL 2014, p. 455–458. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/MIEL.2014.6842189.
14. Boychenko D.V., Kessarinskiy L.N., Pechenkina. The influence of the electrical conditions on total dose behavior of the analog switches.2011 12th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (2011): 822-824. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/RADECS.2011.6131340.

REFERENCES:

[1] Schwartz L. Mathematical methods for the physical Sciences. M.: Mir, 1965 – 412 p. (in Russian).
[2] Barbashov V.M. Simulation of functional failures of digital systems when exposed to radiation. Sensors and systems. 2011, no. 6, p. 29–34. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16497840 (accessed: 23.05.2021) (in Russian).
[3] Gretzer G. General Lattice Theory. 1978. Publisher: Academic Press, Inc., New York, Birkhäuser Verlag, Basel, Akademie Verlag, Berlin ISBN: 0-12-295750-4. URL: https://www.researchgate.net/publication/258514502_General_Lattice_Theory(accessed: 23.05.2021).
[4] Barbashov V.M. Trushkin N.S. With. The relationship of probabilistic and ordinal models in the modeling of functional safety LSI. IT Security (Russia), [S.l.], vol. 15, no. 3, p. 90–95, 2008. ISSN 2074-7136. URL: https://bit.mephi.ru/index.php/bit/article/view/987 (accessed: 23.12.2021) (in Russian).
[5] Barbashov V.M. Trushkin N.S. With. Functional-logical modeling of the quality of operation of the IC when exposed to radiation and electromagnetic radiation. Microelectronics. 2009, vol. 38, no. 1, p. 34–47. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11663446 (accessed: 23.05.2021) (in Russian).
[6] Barbashov V.M., Trushkin N.S., Kalashnikov O.A. Deterministic and nondeterministic failure models of lsi circuits exposed to radiation. Russian Microelectronics. Vol. 44, no. 5, p. 312–315, 2015. DOI: http://dx.doi.org/10.7868/S0544126915050038 (in Russian).
[7] Fuzzy sets and the theory of possibilities. Edited by R.R. Jager. M.: Radio and Communications, 1986. – 408 p. URL: http://www.bookre.org/reader?file=479837 (accessed: 23.12.2021) (in Russian).
[8] Gibbon C.F., Hobing D.Y., Flores R.S. A Radiation-Hard Silicon Gate Bulk CMOS Cell Family. IEEE Trans. 1980, vol. NS-27, no. 6, p. 1712–1715. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/TNS.1980.4331093.
[9] Radiation methods in solid-state electronics. V.S. Vavilov, B.M. Gorin, N.S. Danilin, etc. M.: Radio and Communications, 1990. – 184 p. URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01001538235 (accessed: 23.05.2021) (in Russian).
[10] King E.E., Martin R.L. Effects of total dose ionizing radiation on the 1802 microprocessor. IEEETrans., 1977, NS-24, no. 6, p. 2172–2176. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/TNS.1977.4329186.
[11] Design of computer equipment devices taking into account radiation effects. E.R. Astvatsaturyan, O.N. Golotyuk, Yu.A. Popov, P.K. Skorobogatov, et al. M.: MEPhI Publishing House, 1985. – 84 p. URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01001301654 (accessed: 23.05.2021) (in Russian).
[12] Sogoyan A.V., Chumakov A.I., Nikiforov A.Yu. Method for Predicting CMOS Parameter Degradation Due to Ionizing Radiation with Regard to Operating Time and Conditions. Russian Microelectronics. 1999, vol. 28, no. 4, p. 224–235. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13747675 (accessed: 23.05.2021).
[13] Kalashnikov O.A. and Nikiforov A.Y. TID behavior of complex multifunctional VLSI devices, 2014 29th International Conference on Microelectronics Proceedings - MIEL 2014, p. 455–458. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/MIEL.2014.6842189.
[14] Boychenko D.V., Kessarinskiy L.N., Pechenkina D.V. The influence of the electrical conditions on total dose behavior of the analog switches. 2011 12th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (2011): 822-824. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/RADECS.2011.6131340.

Поступила в редакцию –25 мая 2021 г. Окончательный вариант – 17 февраля 2022 г.
Received –May 25, 2021. The final version – February 17, 2022.